UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE PSICOLOGIA

LEONARDO DUTRA HENRIQUES

Avaliação de visão de cores em um indivíduo
albino de *Sapajus* sp (*Cebus* sp)

versão corrigida

São Paulo
2013

LEONARDO DUTRA HENRIQUES

Avaliação de visão de cores em um indivíduo
albino de *Sapajus* sp (*Cebus* sp)

Dissertação apresentada ao
Instituto de Psicologia da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre em
Ciências

Área de Concentração:
Neurociência e Comportamento

Orientadora:
Prof^a. Dr^a. Dora Fix Ventura

São Paulo
2013

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

Catálogo na publicação
Biblioteca Dante Moreira Leite
Instituto de Psicologia da Universidade de São Paulo

Henriques, Leonardo Dutra.

Avaliação de visão de cores em um indivíduo albino de *Sapajus* sp
(*Cebus* sp) / Leonardo Dutra Henriques; orientadora Dora Selma F.
Ventura; -- São Paulo, 2013.

54 f.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em
Psicologia. Área de Concentração: Psicologia Experimental) –
Instituto de Psicologia da Universidade de São Paulo.

1. Discriminação de cores 2. Albinismo 3. Cambridge Colour Test
4. Primatas 5. Macaco-prego 6. *Cebus apella* I. Título.

QP483

Nome: Leonardo Dutra Henriques

Título: Avaliação de visão de cores em um indivíduo albino de *Sapajus* sp (*Cebus* sp)

Dissertação apresentada ao Instituto de Psicologia da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovada em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ **Assinatura:** _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ **Assinatura:** _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ **Assinatura:** _____

Agradecimentos

Inicialmente gostaria de agradecer a todos os envolvidos neste projeto.

Agradeço a **Professora Dora Ventura**, minha orientadora, que me acolheu em seu laboratório e me ofereceu todas as condições necessárias para a realização desse projeto.

Agradeço ao **Professor Paulo Goulart**, que me instruiu, não apenas com o repertório teórico sobre Análise do Comportamento, como também pelo seu vasto conhecimento sobre o CCT e o equipamento utilizado.

Agradeço, também, ao **Professor Olavo Galvão** que aprovou minha ida ao Pará pelo PROCAD, além de seus valiosos conselhos sobre o projeto tanto em reuniões formais como em conversas cotidianas.

Agradeço ao aluno **Julio Cezar de Oliveira** da EEP que auxiliou em todas as etapas do estudo durante seu estágio com a modelagem do sujeito albino.

Agradeço aos membros da Banca- **Professora Patrícia Izar** e **Professor Bruno Gomes**- pela disponibilidade oferecida e pelos conselhos a engrandecer este projeto.

Agradeço aos meus **amigos** tanto do **LABVIS** como da **EEP**, professores e alunos, que me aguentaram, atrapalhando seus trabalhos, contudo sempre se mostraram dispostos a me ajudar em minhas dúvidas e me acompanhar na cervejinha do final de semana.

Agradeço a **DEUS**, que é o meu sustento e o meu refúgio, amparo nas dificuldades e presença nas minhas alegrias.

Agradeço a **Paloma**, minha namorada, que torna meus dias mais alegres, compartilha minhas angústias, alegrias e esperanças.

Agradeço a minha família, minha mãe **Tânia**, meu pai **Elton** e meu irmão **Alvaro**, por todo apoio durante este período, mesmo com a distância, pela paciência e pelos telefonemas.

Agradeço a meus **amigos** de (**BSB, SP e PA**) pela paciência e verdadeira amizade, que não se desfaz com o tempo e com as dificuldades.

Agradeço pelos financiamentos que me sustentaram materialmente nesse período à:
Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo -
Bolsa de Mestrado 2011/05059-8
Programa Nacional de Cooperação Acadêmica
Procad 182/2007

Apoio Financeiro

Bolsa de Mestrado - processo nº 2011/05059-8,
Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

Bolsa - processo nº 182/2007,
Programa Nacional de Cooperação Acadêmica (CAPES/ PROCAD)

RESUMO

Henriques, L. D. (2013). **Avaliação de visão de cores em um indivíduo albino de *Sapajus* sp (*Cebus* sp).** Dissertação de Mestrado, Instituto de Psicologia, Universidade de São Paulo, São Paulo

O albinismo é um conjunto de alterações fenotípicas caracterizadas pela incapacidade de produzir melanina, fazendo com que a pigmentação de alguns órgãos seja reduzida ou ausente. Discutem-se quais efeitos esta redução ou ausência de pigmentação, na retina, poderia ter sobre a capacidade visual do indivíduo. A visão de cores apresenta um papel muito importante para a sobrevivência e desenvolvimento de primatas. A capacidade de discriminar visualmente o alvo de um fundo apenas pela diferença de matiz pode ser o diferencial tanto para a busca de alimentos, como para a fuga de predadores. Estudos sobre a visão de cores auxiliam a fazer inferências sobre suas bases biológicas e utilidade funcional. Pretendeu-se com esse estudo elucidar a discriminação de cores de um indivíduo albino de *Sapajus* sp, por meio de uma avaliação psicofísica utilizando-se de uma versão modificada do teste computadorizado *Cambridge Colour Test* (CCT), e uma análise genética de DNA, para identificar os genes que codificam as opsinas. Os arranjos genótipo/fenótipo inferidos do indivíduo a partir das elipses foram comparados à composição dos genes que codificam opsina, obtida por análise independente de DNA. Buscou-se, assim, identificar possíveis prejuízos à visão de cores causados pelo albinismo, em relação a *Sapajus* normais. Apesar dos vários problemas decorrentes do albinismo, o sujeito experimental aprendeu a tarefa com sucesso e apresentou, nos testes, limiares de discriminação de cores característicos de dicromacia do tipo deuterânopo com valores dentro dos esperados para o gênero *Sapajus*. Os

resultados comportamentais foram condizentes com o fenótipo inferido a partir da análise genética.

Palavras-chave: discriminação de cores, albinismo, *Cambridge Colour Test*, primatas platirrinos, Macaco-Prego, *Sapajus* sp (*Cebus*).

ABSTRACT

Henriques, L. D. (2013). **Evaluation of the color vision in an albino subject of *Sapajus sp* (*Cebus sp*)**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Psicologia, Universidade de São Paulo, São Paulo

Albinism is a set of phenotypic traits, characterized by the inability to produce melanin, that way the pigmentation of some organs are either reduced or absent. There is no consent on what effects this lower or none pigmentation on retina could lead on subject vision. The color vision represents a major role on primates survival and development. The capacity of visually discriminate targets only by hue differences from the background can be used either to search for food or to avoid predators. Studies on color vision help to make inference on their biological bases and functional utility.

This study aimed to elucidate the color vision discrimination of an albino subject of *Sapajus sp*, through a psychophysical evaluation using a modified version of *Cambridge Colour Test* (CCT) and a genetic analyses of DNA in order to identify genes that codify the opsin. The correlation between genotype and phenotype were inferred by comparison between discrimination ellipses and genetic composition of genes that code opsin. Thus seeking to identify possible color vision losses caused by albinism comparing those analyses with healthy *Sapajus*. Despite many problems associated to albinism, the test subject successfully learn the task and his test showed color discrimination thresholds of a deuteranope dichromacy with values within the expected to subjects of *Sapajus* genera. Those behavioral results where consistent with the phenotype predicted by the genetic analyses.

Key words: colour vision discrimination, albinism, *Cambridge Colour Test*, Platyrrhini, capuchin monkey, *Sapajus sp* (*Cebus*)

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Pico de sensibilidade espectral de três tipos de cones e dos bastonetes na retina de primatas (Brown e Wald, 1963), extraído de Dowling (1987). (adaptado de <http://webvision.med.utah.edu/imageswv/spectra.jpeg>).....12
- Figura 2.** À esquerda um esquema ilustrativo de um bastonete, à direita, esquema de um disco (A), uma Rodopsina (B), a opsina dos bastonetes (*rods* em inglês), associada ao retinal (C), cromóforo, molécula fotossensível derivada da vitamina A, que permite a conversão do sinal luminoso em sinal eletroquímico através de mudanças de configuração durante a absorção de fótons. (adaptado de <http://webvision.med.utah.edu/index.html>).13
- Figura 3.** Micrografia indicando diferenças entre cones e bastonetes em uma retina humana (adaptado de <http://webvision.med.utah.edu/index.html>)15
- Figura 4.** Sensitividade espectral das opsinas de mamíferos (SWS1 e LWS) e variação da faixa espectral das famílias de opsinas de vertebrados (adaptado de Jacobs 2009).18
- Figura 5.** Representação esquemática de uma Opsina de cone M/L de primatas. Os aminoácidos indicados em círculos coloridos são os responsáveis pela mudança de sensibilidade do pico espectral do cone. Em destaque as 3 posições críticas de mudança e a indicação da substituição e de seu efeito no deslocamento do pico espectral (adaptado e revisado de Jacobs 2008).19
- Figura 6.** Esquema representativo da filogenia de primatas. Em vermelho a ocorrência de alta proporção de pseudogenes no receptor olfativo: característica comum às espécies com padrão genético associado à visão tricromática (adaptado de Gilad et al. 2004).21
- Figura 7.** Eficácia luminosa para comprimentos de onda do espectro visível. Conjunto de dados de sistema visual humano. (adaptado de: www.handprint.com/HP/WCL/color1.html).25
- Figura 8.** Exemplo do arranjo de estímulos utilizado originalmente no teste *Cambridge Colour Test (CCT)*, demonstrando um teste pseudoisocromático que utiliza as estratégias de um alvo e fundo compostos por uma matriz de objetos com bordas individuais e variação aleatória de brilho propostas por Stilling (1877).26
- Figura 9.** Linhas de confusão estimadas para as formas Protan, Deutan e Tritan de dicromacia humana, plotadas em um diagrama de cromaticidade CIE 1976 $u'v'$. (adaptado de Dain 2004).27
- Figura 10.** Diagrama de Cromaticidade CIE 1976 $u'v'$. Espaço de cor que demonstra cores visíveis para a espécie humana, onde a borda externa corresponde a cores monocromáticas correspondentes a um único comprimento de onda. Ao se afastar das bordas, ocorre mistura de cores, chegando até pontos com componentes de todos comprimentos de onda, acromáticos, visivelmente brancos. O triângulo inscrito no diagrama é uma representação esquemática do limite de reprodução de cor do monitor (gamut). E os eixos numerados de 1 a 20 representam o posicionamento dos vetores em relação ao ponto central relativo à cromaticidade do fundo.28
- Figura 11.** *Sapajus sp*, albino utilizado como sujeito experimental, alojado em gaiola-viveiro na Escola Experimental de Primatas (Belém, Pará). Foto por Leonardo Dutra Henriques.....31

- Figura 12.** Aparato para avaliação de visão de cores, embutido em armário tipo rack móvel e câmara experimental de acrílico com dois comedouros onde caíam as pelotas utilizadas como recompensa e na abertura era posicionado o monitor sensível ao toque . Foto por Leonardo Dutra Henriques.33
- Figura 13.** Diagrama da configuração do aparato necessário para a realização das sessões experimentais. As setas representam a atuação de cada equipamento e o alvo da ação.34
- Figura 14.** Exemplo do arranjo de estímulo utilizado no teste adaptado por Goulart e colaboradores. Estímulo sobre fundo com a mesma luminância média. A substituição do alvo da abertura do C de Landolt utilizado no teste original para um conjunto de círculos em um formato aproximado de quadrado permite a utilização do teste com indivíduos não-verbais.35
- Figura 15.** Comparação entre limiares de discriminação, utilizando os mesmos vetores de teste do Sujeito albino utilizado neste experimento, representado pela linha escura, com outros 7 sujeitos de *Sapajus* sp. com o fenótipo Deutan, testados por Goulart e colaboradores (2013), representados pelas linhas mais claras.41
- Figura 16.** Elipses de discriminação de cor gerada a partir do limiares de discriminação alvo fundo de um *Sapajus* deuteranope testado por Goulart et al. (2013) e do *Sapajus* albino. Cada uma das 20 marcações representa a média das 7 últimas reversões (acerto seguido de erro ou erro seguido de acerto) para cada matiz utilizado no experimento.42

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1. Descrição da nomenclatura das Discromatopsias, segundo o tipo de Cone afetado e a forma do prejuízo: ausência total ou alteração na composição, causando deslocamento da curva de sensibilidade espectral em relação à média.16**
- Tabela 2. Principais aminoácidos envolvidos na determinação do pico espectral dos cones M/L de Primatas do Novo Mundo (adaptado de Jacobs 2008 e Bonci 2011).21**
- Tabela 3. Limiares descritos pela média das sete últimas reversões (acerto seguido de erro, ou erro seguido de acerto) para os 20 vetores utilizados no experimento e suas coordenadas u'v'.....40**
- Tabela 4. Resultados da análise genética do sujeito albino em comparação com outros indivíduos do mesmo gênero testados por Goulart e colaboradores (2013). A coluna Genótipo mostra o aminoácido encontrado nas posições 180,277 e 285 respectivamente sendo S= serina, A= alanina, Y= tirosina, F= fenilalanina, T= treonina. A coluna λ Max mostra a variação no pico de absorção espectral causada pela mudança da composição dos aminoácidos. A coluna Fenótipo utiliza a nomenclatura usada para humanos a fim de descrever o padrão comportamental esperado para essa combinação de aminoácidos.....43**

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	11
Teorias de visão de cores	11
Fotorreceptores e pigmentos visuais	13
Opsinas em Primatas	18
Albinismo e suas Consequências no Sistema Visual	22
Testes de Visão de Cores	24
 OBJETIVO	 29
 MÉTODO	 31
Aparato	32
Estímulo	34
Procedimento	35
 RESULTADOS	 39
Avaliação comportamental	39
Análise Genética	43
 DISCUSSÃO	 44
 CONCLUSÕES	 45
 REFERÊNCIAS	 46
 GLOSSÁRIO	 50

INTRODUÇÃO

Teorias de visão de cores

A luz é composta por fótons, partículas com energia que descrevem um padrão ondulatório característico, o qual pode ser descrito em termos de comprimento de onda (distância entre dois vales). Ao incidir em um objeto, a luz é em parte absorvida e em parte refletida, essas propriedades dependem das características do objeto, como absorbância e textura. A sensação de cor resulta da interpretação pelo sistema visual da luz refletida pelo objeto. A cor não é, portanto, uma propriedade do objeto e sim o produto da reflexão da luz no objeto e da correspondente interpretação feita pelo sistema visual (Levine 2000). Todavia, a discriminação de cores depende de existir no organismo um sistema adaptado para converter a energia luminosa em sinal eletroquímico e sua posterior interpretação.

O termo cor é, normalmente, associado com a capacidade de diferenciar objetos em termos do comprimento de onda que eles refletem, por exemplo, vermelho (700nm) e azul (450nm). No entanto, a esta propriedade diretamente ligada à diferenciação de comprimentos de onda, dá-se o nome de Matiz. Segundo a Comissão Internacional de Iluminação (CIE)¹, a cor percebida é a característica da percepção visual que pode ser descrita pelos seus atributos de matiz, brilho e saturação. O matiz está relacionado ao comprimento de onda da luz refletida; a saturação relaciona-se com a pureza da cor, ou seja, com a variedade de comprimentos de onda que compõe a luz; e o brilho relaciona-se com a quantidade da luz, sendo uma medida de intensidade.

O estudo das cores e da forma como os indivíduos as percebem, início já presente desde os pensadores gregos, teve um marco importante na descoberta de Isaac Newton sobre a natureza da luz, com a demonstração da decomposição da luz branca em cores espectrais,

¹ cf. GLOSSÁRIO

por meio do uso de prismas (Feitosa-Santana, 2006). Baseado em estudo sobre a natureza da luz, Thomas Young (1773-1829) propôs uma teoria para a visão de cores, segundo a qual o indivíduo precisaria perceber apenas três tipos de cores primárias para diferenciar todas as cores espectrais (Figura 1). Posteriormente, Von Helmholtz (1821-1894) fez experimentos de mistura de cores que evidenciaram a teoria de Young, a qual passou a ser conhecida como a Teoria de Young-Helmholtz (Gouras, 1991).

Figura 1. Pico de sensibilidade espectral de três tipos de cones e dos bastonetes na retina de primatas (Brown e Wald, 1963), extraído de Dowling (1987). (adaptado de <http://webvision.med.utah.edu/imageswv/spectra.jpeg>)

Fotorreceptores e pigmentos visuais

Para a captação da luz é necessária a presença de opsinas, uma família de proteínas presente nos fotorreceptores de animais, capaz de converter o sinal luminoso em sinal eletroquímico (Figura 2). Na retina de primatas, encontram-se dois tipos diferentes de fotorreceptores, os bastonetes e os cones (Figura 3), os quais se subdividem em três tipos.

Figura 2. À esquerda um esquema ilustrativo de um bastonete, à direita, esquema de um disco (A), uma Rodopsina (B), a opsina dos bastonetes (*rods* em inglês), associada ao retinal (C), cromóforo, molécula fotossensível derivada da vitamina A, que permite a conversão do sinal luminoso em sinal eletroquímico através de mudanças de configuração durante a absorção de fótons. (adaptado de <http://webvision.med.utah.edu/index.html>).

Os bastonetes são altamente sensíveis à luz, de ação lenta e estão em maioria na retina de primatas, porém não se apresentam na fóvea. Em contrapartida, os cones são menos sensíveis à luz, de ação rápida e ocorrem em alta densidade na fóvea. Os bastonetes atuam em situações de baixa luminosidade (escotópica), condição em que os cones não estão sendo

sensibilizados ou apresentam respostas muito baixas. Devido ao fato de atuarem sozinhos, diz-se que não contribuem para a visão de cores. Entretanto, em situações de iluminação média (mesópica), atribui-se à participação dos bastonetes um aumento na percepção do azul em relação ao amarelo (Buck et al.,1998). Em situações de alta luminosidade (fotópica) os bastonetes não contribuem, porque já se encontram saturados e não têm variedade na resposta, portanto nessa situação a descrição visual do meio deriva da ativação dos diferentes tipos de cones. O sistema nervoso transmite informações pelos neurônios, de forma codificada, utilizando a a frequência e a duração da atividade elétrica. No caso do sistema visual, quando um fóton incide sobre um fotorreceptor e é absorvido, a única informação transmitida é um impulso relativo a essa captura, daí a necessidade de mais de um tipo de fotopigmento para a percepção dos diferentes matizes, uma vez que, com um único fotorreceptor, perde-se a informação sobre o comprimento de onda, mantendo-se apenas a informação da quantidade de fótons. Este fenômeno, descrito por William Rushton, é chamado “Princípio da Univariância” (Rushton, 1972). Portanto, para que possa haver visão de cores, é necessário que o sistema visual tenha cones com curvas espectrais diferentes, absorvendo faixas distintas do espectro visível (Figura 1), além de um substrato neural que permita a ele comparar a informação de quantidade de fótons absorvidos nos diferentes tipos de cones e, assim, determinar o comprimento de onda observado. Como dito, anteriormente, a capacidade de discriminação visual de cores depende da existência de mais de um tipo de cone na retina (Princípio da Univariância), assim como da existência de interações neurais entre os canais cromáticos iniciados em cada um desses tipos de cones, permitindo a troca de informação entre estes canais. A diferença entre os tipos de cones da retina está na opsina que eles contêm. Diferentes opsinas caracterizam-se por terem curvas espectrais com capacidade máxima de absorção de luz em diferentes comprimentos de onda do espectro luminoso (Jacobs, 1996).

Figura 3. Micrografia indicando diferenças entre cones e bastonetes em uma retina humana (adaptado de <http://webvision.med.utah.edu/index.html>)

No caso de mamíferos, a forma mais comum de visão de cores é a dicromacia (Jacobs, 1996). Entretanto, os Primatas do Velho Mundo (Catharrini), incluindo humanos, possuem visão tricromática, com três variedades de cones, cujas curvas espectrais são mais sensíveis para comprimentos de onda: curtos (S), médios (M) e longos (L). No caso dos cones S, o gene responsável pela opsina correspondente localiza-se no cromossomo autossômico 7, enquanto para os dois outros tipos de cones, M e L, os respectivos genes localizam-se em cada cromossomo sexual X. Os Primatas do Novo Mundo (Platyrrhini) em geral possuem apenas um gene codificador de opsina no cromossomo X, resultando em machos dicromatas e fêmeas que podem ser di ou tricromatas, dependendo da variedade de alelos para opsina nos seus genes.

Em humanos ocorrem deficiências de visão de cores, que podem ser desde acromatopsia, condição na qual o sujeito possui apenas uma ou nenhuma opsina, e nenhuma

visão de cores, até discromatopsia ou daltonismo, condição em que o sujeito possui visão de cores, contudo confunde cores que seriam diferenciáveis para sujeitos com visão tricromática. As discromatopsias são denominadas segundo o tipo de cone afetado e o tipo de defeito, ausência do cone ou da opsina ou uma alteração genética que causa apenas o deslocamento da curva espectral (Tabela 1). Se o defeito afeta o cone L, ele recebe o prefixo "Protan", caso não haja expressão dessa variedade de cone, recebe o sufixo "opia" e configura-se uma Protanopia; ou uma Protanomalia em caso de variação na expressão da opsina, causando deslocamento da curva espectral deste cone em relação à média, recebendo o sufixo "anomalia". Por outro lado se o defeito afeta o cone M, recebe o prefixo "Deutan", caso seja uma perda completa da curva de absorção configura-se como Deuteranopia ou Deuteranomalia em caso de deslocamento. Se o defeito for no cone S, recebe o prefixo "Tritan", caso seja uma perda completa da curva, configura-se como Tritanopia ou Tritanomalia em caso de deslocamento (Birch, 2001).

Tabela 1. Descrição da nomenclatura das Discromatopsias, segundo o tipo de Cone afetado e a forma do prejuízo: ausência total ou alteração na composição, causando deslocamento da curva de sensibilidade espectral em relação à média.

Tipo de Defeito	Cone S	Cone M	Cone L
Ausência	Tritanopia	Deuteranopia	Protanopia
Deslocamento	Tritanomalia	Deuteranomalia	Protanomalia

O conjunto de estímulos cromáticos que, quando controlada a intensidade luminosa, são indistinguíveis para indivíduos dicromatas, pode ser representado por linhas de confusão, em diagramas de cromaticidade como o CIE $u'v'$ 1976. As linhas de confusão são específicas para cada tipo de defeito de visão de cores e permitem a seleção adequada de estímulos cromáticos para a avaliação dos defeitos de visão de cores. Outras características serão abordadas no capítulo **Testes de Visão de Cores**. Estas anomalias são, em geral, causadas por alterações nos genes que codificam as opsinas, podendo ser herdadas, caso esses genes passem para os descendentes.

Além dessas, há anomalias que podem ser adquiridas ao longo da vida como, por exemplo, no caso de pessoas com glaucoma (Castelo-Branco e colaboradores, 2004) ou com Neuropatia Óptica hereditária de Leber (Ventura e colaboradores, 2007). As deficiências adquiridas não apresentam caráter hereditário e podem sofrer alterações com o passar do tempo (Schwartz, 2004).

Devido à grande importância dos estudos voltados para a busca por uma maior compreensão dos defeitos de visão de cores, torna-se relevante o estudo em espécies próximas, como os Primatas. Para isso utilizam-se os testes de visão de cores, que, além de atestar a presença de visão de cores, a fim de determinar suas dimensões e precisão, auxiliam a fazer inferências sobre suas bases biológicas e utilidade funcional (Jacobs, 2004).

Opsinas em Primatas

A maioria dos mamíferos possui dois genes que dão origem às opsinas, o LWS e o SWS1 (Figura 4). Em primatas, as mutações, hoje, observadas, provavelmente ocorreram após a segregação em Primatas do Novo Mundo e Primatas do Velho Mundo, há cerca de 40 milhões de anos, levando a mutações distintas entre os grupos (Hunt et al., 1998). Especula-se que em Primatas do Velho Mundo houve uma duplicação do gene LWS, antes da radiação das espécies, levando a tricromacia uniforme entre machos e fêmeas, e nos Primatas do Novo Mundo a hipótese é de que houve sequências de mutações, originando uma gama de alelos possíveis e o polimorfismo entre machos e fêmeas.

Figura 4. Sensitividade espectral das opsinas de mamíferos (SWS1 e LWS) e variação da faixa espectral das famílias de opsinas de vertebrados (adaptado de Jacobs 2009).

Entre as opsinas M e L existe uma identidade de 96% nas sequências de aminoácidos, as quais são portanto muito semelhantes entre si. Entretanto as opsinas M/L são menos similares às do cone S, possuindo apenas 46% de semelhança entre si (Nathans et al., 1986). A mudança no pico de sensibilidade espectral dos cones M e L é causada pela mudança

de poucos aminoácidos, e os três aminoácidos responsáveis pela maior parte da diferença são expressos pelos éxons 3 e 5, localizados nos sítios 180 (Ser - serina ou Ala - alanina), 277 (Tyr - tirosina ou Phe - fenilalanina) e 285 (Thr - treonina ou Ala - alanina) (Neitz et al., 1991; Williams et al., 1992; Yokoyama & Radlwimmer, 1999; Kawamura et al., 2001; Hiramatsu et al., 2004) (Figura 5). O efeito de cada substituição já é bem conhecido, sendo possível inferir a curva de absorbância do fotopigmento por meio da combinação desses três aminoácidos nessas posições (Neitz et al., 1991; Hunt et al., 1993; Asenjo et al., 1994) (Tabela 2).

Figura 5. Representação esquemática de uma Opsina de cone M/L de primatas. Os aminoácidos indicados em círculos coloridos são os responsáveis pela mudança de sensibilidade do pico espectral do cone. Em destaque as 3 posições críticas de mudança e a indicação da substituição e de seu efeito no deslocamento do pico espectral (adaptado e revisado de Jacobs 2008).

Nos Primatas do Velho Mundo, tem-se como regra machos e fêmeas com tricromacia uniforme. Apesar do padrão polimórfico de machos dicromatas e fêmeas com potencial para di- ou tricromacia ser majoritário, entre os Primatas do Novo Mundo, dois gêneros

apresentam padrões únicos. Um deles é o *Aotus* (Macaco-da-noite), único gênero de primatas com hábitos noturnos, que não apresenta Cone S viável, tendo apenas um cone M/L (pico 530nm) causado por uma mutação no gene da opsin do Cone S que impede a expressão da proteína (Jacobs et al., 1996b). O outro é o gênero *Alouatta* (Bugio), que possui dois alelos diferentes codificadores de opsin no seu cromossomo-X semelhante aos Primatas do Velho Mundo (Jacobs et al., 1996) (Figura 6). Vale ressaltar que a visão de cores depende de um processamento em vários estágios, no qual os fotorreceptores correspondem a um “primeiro estágio” (De Valois & De Valois, 1993). Portanto para se avaliar a visão de cores de um indivíduo é necessária uma avaliação dos vários estágios do processamento visual. Para isto, utiliza-se a complementação da informação genética com outras evidências fisiológicas e comportamentais.

Diversas hipóteses são levantadas, ainda sem consenso, para a causa do surgimento da tricromacia em primatas e suas consequências. Gilad e colaboradores (2004) sugerem que está ligada à deterioração do repertório olfativo que deve ter ocorrido por ocasião da aquisição da visão tricromática em primatas. Outros autores atribuem a mudança à preferência alimentar. Por um lado, defende-se a hipótese da frugivoria, na qual a necessidade de discriminação de frutas entre as folhagens verdes das árvores teria favorecido a seleção da tricromacia (Osorio & Vorobyev, 1996; Regan et al., 2001; Smith et al., 2003; Surridge et al., 2002) em contraposição à hipótese da folivoria, na qual a tricromacia seria selecionada pela necessidade da discriminação de folhas mais novas e de coloração mais avermelhada entre a folhagem verde (Dominy & Lucas, 2001; Dominy et al., 2003). E ainda há quem sugere que seja apenas um evento de baixa probabilidade (Jacobs et al., 1996).

Tabela 2. Principais aminoácidos envolvidos na determinação do pico espectral dos cones M/L de Primatas do Novo Mundo (adaptado de Jacobs 2008 e Bonci 2011)

Pico de Absorção (nm)	Gênero	Posição 180	Posição 277	Posição 285
562	<i>Cebus, Saimiri, Callithrix, Saguinus, Alouatta</i>	Serina	Tirosina	Treonina
556	<i>Cebus, Callithrix, Saguinus, Aotus</i>	Alanina	Tirosina	Treonina
550	<i>Cebus, Saimiri</i>	Alanina	Fenilalanina	Treonina
543	<i>Cebus, Callithrix, Saguinus</i>	Alanina	Tirosina	Alanina
535	<i>Cebus, Saimiri, Alouatta</i>	Alanina	Fenilalanina	Alanina

Figura 6. Esquema representativo da filogenia de primatas. Em vermelho a ocorrência de alta proporção de pseudogenes no receptor olfativo: característica comum às espécies com padrão genético associado à visão tricromática (adaptado de Gilad et al. 2004).

Albinismo e suas Consequências no Sistema Visual

O albinismo é uma doença que afeta vários animais. Em humanos, onde é melhor descrito, são previstas diversas formas de albinismo que têm em comum a incapacidade de produzir melanina e, com isso, possuem a pigmentação de alguns órgãos reduzida, ou mesmo ausência de pigmentação. Em sua revisão, Kinnear (1985) descreve 11 diferentes desordens cujo fenótipo caracteriza-se como albino, desde casos em que há hipopigmentação apenas dos olhos, como no albinismo ocular (OA) e casos em que são afetados também os cabelos e a pele, como no albinismo oculocutâneo (OCA). Em mamíferos não-humanos, os casos de albinismo total descritos envolvem um panorama similar ao albinismo oculocutâneo tirosinase-negativa (OCA1A), em que ocorre a ausência de pigmentação nos olhos, pelagem e pele devido a problemas na melanogênese. Em mamíferos não-humanos também são encontrados casos de albinismo parcial, assim como leucismo, condição em que o animal não apresenta pigmentação na pelagem, mas retém nos olhos e patas. Apesar de raro existem relatos de albinismo em diversas espécies de animais; McCardle (2012) fez uma revisão da literatura e encontrou relatos de 572 espécies em 51 ordens.

O albinismo em humanos está associado a vários defeitos de visão. Summers (1996) enumera: redução na acuidade visual (20/100 e 20/200); fotossensibilidade; estrabismo; "Iris Transillumination", situação em que a luz refletida na retina não é filtrada pela íris; nistagmo; hipoplasia foveal; hipopigmentação do fundo do olho e desvio no cruzamento das fibras ópticas. Pérez-Carpinell e colaboradores (1992) observaram visão de cores em 9 sujeitos albinos através das pranchas de Ishihara, teste de Roth de 28 matizes e anomaloscópio, e identificaram quatro sujeitos com visão de cores normal, dois deuteranômalos e três protanômalos, dois dos quais tinham um olho com visão de cores tricromática normal.

Estudos avaliando a capacidade visual de animais albinos, em especial primatas, são escassos, em especial devido à raridade de se encontrar primatas com esse fenótipo. Guillery e colaboradores (1983) fizeram análises eletrofisiológicas, histológicas e anatômicas em um indivíduo albino de *Cercopithecus aethiops*, uma espécie de primata do velho mundo. Em seus experimentos, eles concluem que, assim como em humanos, primatas albinos apresentam nistagmo optocinético; ausência de fóvea e uma alta concentração de células ganglionares na região onde se localiza a fóvea em primatas normais; extenso cruzamento das fibras ópticas em especial nas fibras magnocelulares; baixa estratificação do núcleogenículado lateral e uma conformação diferente de destino das vias visuais. Em outro estudo, Hoffmann e colaboradores (2003) afirmam que a representação topográfica do campo visual de albinos humanos é semelhante à de outros primatas estudados e que, diferentemente de outros mamíferos que exibem mecanismos que permitem uma maior reorganização das projeções talamocorticais, estes dois grupos poderiam não compartilhar padrões visuais descritos em outros mamíferos, mas poderiam ser comparáveis entre si.

Portanto, apesar de algumas inferências do padrão de visão de albinos humanos, não existe, na literatura, uma informação específica sobre o comportamento visual de primatas albinos. Este trabalho visa acrescentar informações sobre a visão de cores em um sujeito albino do gênero *Sapajus* (*Cebus*).

Testes de Visão de Cores

Apesar de os estudos genéticos e morfofisiológicos oferecerem uma base a respeito da visão de cores dos indivíduos, os testes comportamentais, nos quais o indivíduo seja “forçado” a escolher baseado apenas em pistas visuais, evidenciam a capacidade dele de discriminar os estímulos apresentados, demonstrando de forma comparável o funcionamento de todo o conjunto genético\fisiológico. Uma característica crítica no delineamento de testes de visão de cores é que devem, pois, ser eliminadas todas as outras formas de pistas, de forma que o desempenho dos sujeitos fique sob controle restrito das variações de comprimento de onda.

Uma característica muito importante a ser controlada em testes de discriminação de cores é o brilho. Mesmo que esses apresentem alvos com a mesma intensidade luminosa, o sistema visual tem uma eficácia de captura dos fótons distinta para cada comprimento de onda (Figura 7) (Dain, 2004). E, também, devido a limitações intrínsecas aos métodos de reprodução dos matizes, há a formação de uma fronteira virtual (artefato de borda) entre o alvo e o fundo que demarca o alvo, independentemente de sua composição espectral.

Figura 7. Eficácia luminosa para comprimentos de onda do espectro visível. Conjunto de dados de sistema visual humano. (adaptado de: www.handprint.com/HP/WCL/color1.html).

Estes artefatos podem ser minimizados e até são corrigidos ao se utilizar um alvo e fundo compostos por partes, cada uma com seu contorno e variação aleatória de brilho (Stilling, 1877). Uma vez que a área a ser distinguida não possui uma forma sólida e sim um conjunto de objetos com suas próprias bordas assim como o fundo, elimina-se o artefato de borda. Com uma variação aleatória de brilho para cada objeto da matriz do alvo e do fundo, a variação da eficácia luminosa para cada comprimento de onda se confunde com a variação global de brilho. Estas características foram incorporadas nos testes pseudoisocromáticos, como o *Cambridge Colour Test*, (Figura 8) versão disponibilizada comercialmente pela *Cambridge Research Systems* (Rochester, UK) do teste de discriminação de cor de Mollon-Reffin (Mollon & Reffin, 1989, Mollon & Regan, 2000; Regan, Reffin & Mollon, 1994).

Figura 8. Exemplo do arranjo de estímulos utilizado originalmente no teste *Cambridge Colour Test (CCT)*, demonstrando um teste pseudoisocromático que utiliza as estratégias de um alvo e fundo compostos por uma matriz de objetos com bordas individuais e variação aleatória de brilho propostas por Stilling (1877).

Além das variáveis a serem controladas já descritas, a variável com a qual se deve ter o maior controle para o teste é o matiz. Dain (2004), em sua revisão sobre teste de visão de cores, ressalta que, para que o teste de visão de cores seja eficaz, é importante que os matizes a serem comparados estejam próximos das linhas de confusão previstas para a espécie. Esta adaptação do CCT feita por Goulart e colaboradores (2008) faz uso das mesmas linhas de confusão do diagrama CIE 1976 u'v' (Figura 9). Ainda que este tenha sido planejado para humanos, a adoção do diagrama CIE com esses animais é justificada pela grande semelhança entre as sensibilidades espectrais de seus fotopigmentos M/L e os de Primatas do Novo Mundo como Macacos-de-Cheiro (Jacobs & Deegan, 2003, Mancuso 2006) e Macaco-Prego (Goulart et al. 2013).

Figura 9. Linhas de confusão estimadas para as formas Protan, Deutan e Tritan de dicromacia humana, plotadas em um diagrama de cromaticidade CIE 1976 $u'v'$. (adaptado de Dain 2004).

O diagrama de cromaticidade CIE 1976 $u'v'$ (Figura 10) é um espaço de cor que foi aprimorado ao longo do tempo e conta com algumas características que o tornam ideal para este tipo de estudo: os pontos do contorno da figura representam luzes monocromáticas com saturação máxima e correspondem a apenas um comprimento de onda, tomando-se um destes pontos do contorno como origem, os pontos entre este e o centro do diagrama apresentam valores decrescentes de saturação. Este estudo utiliza um ponto acromático ($u'=0,1977$; $v'=0,4689$) como matiz correspondente ao fundo. E para alvo, 20 vetores igualmente espaçados distando 18° entre si, de forma que seu conjunto forma uma circunferência com 360° a partir do ponto acromático. Dessa forma cada vetor em sua distância máxima representa um comprimento de onda altamente saturado e, em sua distância mínima, aproxima-se do ponto central até que se torne indistinguível do ponto de fundo. Se o vetor coincidir ou se aproximar da linha de confusão para o sujeito experimental, este deve cometer erros em alvos altamente saturados, mesmo distantes do ponto do fundo; caso não esteja próximo de uma linha de confusão prevista para a espécie ou o sujeito seja tricromata (não ocorrem linhas de confusão para tricromatas no diagrama CIE 1976 $u'v'$), os erros devem ocorrer próximos do ponto do fundo.

Figura 10. Diagrama de Cromaticidade CIE 1976 $u'v'$. Espaço de cor que demonstra cores visíveis para a espécie humana, onde a borda externa corresponde a cores monocromáticas correspondentes a um único comprimento de onda. Ao se afastar das bordas, ocorre mistura de cores, chegando até pontos com componentes de todos comprimentos de onda, acromáticos, visivelmente brancos. O triângulo inscrito no diagrama é uma representação esquemática do limite de reprodução de cor do monitor (gamut). E os eixos numerados de 1 a 20 representam o posicionamento dos vetores em relação ao ponto central relativo à cromaticidade do fundo.

OBJETIVO

Uma vez que existe uma literatura muito escassa acerca da capacidade de discriminação de cores de indivíduos albinos não-humanos, pretendeu-se com esse estudo elucidar a discriminação de cores de um indivíduo albino de *Sapajus* sp. (macaco-prego). A proximidade com a espécie humana torna os primatas um grupo de interesse para estudos clínicos. O uso de *Sapajus* (*Cebus*) se justifica por possuir um grande número de estudos prévios que avaliaram sua capacidade de discriminação de cores (Goulart, 2013), além de ser uma técnica já utilizada com sucesso para obter informações sobre genes que provocam alterações na visão de cores e conhecer as variações de opsina encontradas no gênero (Soares, 2010, Bonci, 2011).

Este estudo foi realizado por meio de uma avaliação psicofísica, utilizando um teste computadorizado, inspirado no *Cambridge Colour Test* (CCT) e uma análise genética de DNA, para identificar os genes que codificam as opsinas. No presente projeto foi realizada a avaliação comportamental da discriminação de cores do indivíduo albino, por meio de uma versão modificada do teste computadorizado *Cambridge Colour Test* (CCT), previamente utilizado em humanos adultos, o qual foi adaptado para eliminar a necessidade de instruções (Goulart, et al., 2008, em estudo com crianças) e utilizado com sucesso em Primatas do Novo Mundo (Goulart et al. 2013). Este teste oferece uma medida quantitativa da visão de cores ao determinar limiares de discriminação da diferença cromática entre alvo e fundo definidos em matizes potencialmente indiferenciáveis para indivíduos dicromatas (Mollon & Reffin, 1989, Mollon & Regan, 2000; Regan, Reffin & Mollon., 1994), permitindo assim não apenas observar os efeitos do albinismo no indivíduo, como também quantificar a diferença de desempenho do indivíduo albino e de outros indivíduos do gênero *Sapajus*.

Também almejou-se com este estudo estabelecer um procedimento comportamental capaz de modelar a resposta de indivíduos mais arredios e menos engajados na tarefa proposta. Em consequência disso, poder-se-á ampliar a identificação das formas de visão de cores presentes em indivíduos de outras espécies de Primatas do Novo Mundo, ainda não estudadas e/ou que apresentem arranjos genótipo/fenótipo para a visão de cores diferentes do padrão geral de Primatas do Novo Mundo.

MÉTODO

Para a avaliação da Visão de Cores do indivíduo de *Sapajus* sp. albino (Figura 11) experimentalmente ingênuo, utilizou-se uma avaliação comportamental da visão de cores baseada no *Cambridge Colour Test* adaptada por Goulart e colaboradores (2013). Para a análise genética foram coletadas amostras de sangue dos animais e encaminhadas para investigação, por meio de exame independente de DNA. Este procedimento foi realizado no Laboratório de Genética de Opsinas do Instituto de Psicologia da Universidade de São Paulo, seguindo protocolo descrito em Goulart e colaboradores (2013).

Figura 11. *Sapajus* sp, albino utilizado como sujeito experimental, alojado em gaiola-viveiro na Escola Experimental de Primatas (Belém, Pará). Foto por Leonardo Dutra Henriques.

Sujeito

O sujeito experimental pertence à família Cebidae, a qual, recentemente, sugeriu-se a divisão do gênero *Cebus* (macaco-prego) (Lynch, 2012) em dois gêneros *Cebus* (gráceis) e *Sapajus* (robustos). Em decorrência do albinismo e suas consequências, como a falta de pigmentação, não se pode precisar fenotipicamente a espécie do sujeito experimental, referido neste trabalho, por seu maior grau de certeza como *Sapajus* sp. O gênero *Sapajus* sp. é caracterizado por utilizar todos estratos, omnivoria, com uma dieta rica em alimentos altamente energéticos como frutos (60%). (Auricchio, 1995) São animais conhecidos por sua

alta capacidade manual, solução de problemas e complexidade do grupo, em geral de 8 a 16 indivíduos. O indivíduo estudado é um macho adulto saudável, exibindo apenas problemas relacionados ao albinismo, como baixa ou nenhuma pigmentação dos órgãos nistagmo optocinético e hipersensibilidade na palma das patas.

Condições da avaliação comportamental

O sujeito experimental desta espécie encontrava-se alojado em uma gaiola-viveiro cúbica de lado (2,5m), na Escola Experimental de Primatas (EEP) da Universidade Federal do Pará (UFPA) em Belém, Pará. O pátio onde se localizava a gaiola-viveiro possuía iluminação natural, oferecendo um ciclo de aproximadamente 12h/12h de claro e escuro, variando, naturalmente, ao longo do ano. No local de coleta de dados, os testes eram realizados no escuro. Transportava-se o sujeito até uma Câmara Experimental cúbica, com 60cm de lado, acoplada ao aparato onde os testes eram realizados, retornando o animal para a gaiola-viveiro, após o término da sessão. Durante os meses de coleta, a temperatura média foi de 26°C e umidade relativa do ar 90% (fonte: Instituto Nacional de Meteorologia INMET-estação Belém).

Aparato

O aparato experimental (Figura 12) consiste de um computador embutido em um rack móvel que permitia seu deslocamento para o local de coleta. O teste utilizado consiste em uma adaptação para sujeitos não-verbais do *Cambridge Colour Test* (CCT v2.0 – Cambridge Research Systems, Rochester, UK) já validada por Goulart e colaboradores (Goulart *et al.* 2008, Goulart *et al.* 2013). A geração de estímulos foi feita por meio do sistema ViSaGe (Cambridge Research Systems), que permitia resolução de cor de 16-bits e controle de luminância. As tentativas foram apresentadas em um monitor CRT Diamond Pro 2070SB (Mitsubishi) o qual recebeu comandos de toque graças a uma tela CarrolTouch

Infrared (Elo Touch Systems) afixada à frente do mesmo. O toque foi identificado por meio de um retículo de LEDs infravermelhos, sem a necessidade de uma superfície sensível sobreposta ao monitor (Figura 13). Desse modo, a interface de toque não impõe qualquer alteração à imagem apresentada na tela.

Figura 12. Aparato para avaliação de visão de cores, embutido em armário tipo rack móvel e câmara experimental de acrílico com dois comedouros onde caíam as pelotas utilizadas como recompensa e na abertura era posicionado o monitor sensível ao toque .

Figura 13. Diagrama da configuração do aparato necessário para a realização das sessões experimentais. O computador é utilizado para definir os parâmetros da sessão, como cor do alvo e do fundo, saturação máxima e intervalo entre tentativas. O Visage é um gerador de estímulos da *Cambridge Research System*, que comanda o monitor CRT onde os estímulos são apresentados para o sujeito experimental. Toques na tela são identificados por um retículo de LEDs infravermelhos que enviam a informação ao computador que compara a área tocada com o estímulo programado. Se o toque ocorrer na região alvo, o computador ativa um dispensador automático de reforço, disponibilizando o reforço para o sujeito experimental.

Estímulo

A versão adaptada do *Cambridge Colour Test* por Goulart e colaboradores (2008) consiste em um teste pseudoisocromático, uma matriz de círculos de tamanhos variáveis e brilho variando entre seis valores no intervalo de 7 cd/m^2 e 15 cd/m^2 . Para este experimento, o matiz do fundo foi definido em um ponto acromático ($u'=0,1977$; $v'=0,4689$) do diagrama CIE 1976 $u'v'$, e o alvo era uma composição dessa matriz na forma aproximada de um quadrado de 5 cm de lado com um valor de matiz diferente do fundo (Figura 14), objetivando

que o sujeito experimental discrimine o alvo do fundo baseado na diferença de matiz entre eles. O matiz do alvo era determinado por vinte vetores predefinidos que passavam pelo ponto acromático definido como cor do fundo. Cada vetor corresponde a um matiz no diagrama CIE 1976 $u'v'$. Inicialmente, o alvo encontrava-se na distância máxima do eixo ao fundo ($d=0,110$ unidade $u'v'$) que corresponde à saturação máxima do matiz. À medida que o indivíduo progride no teste, essa distância vai diminuindo até o valor mínimo ($d=0,020$ unidades $u'v'$), diminuindo assim a saturação do matiz, aproximando o alvo do fundo acromático e dificultando a discriminação dos mesmos.

Figura 14. Exemplo do arranjo de estímulo utilizado no teste adaptado por Goulart e colaboradores (2008). Estímulo sobre fundo com a mesma luminância média. A substituição do alvo da abertura do C de Landolt utilizado no teste original (Cambridge Colour Test) para um conjunto de círculos em um formato aproximado de quadrado que pode ser apresentado em nove locais da tela sensível. Esta modificação permite a utilização do teste com indivíduos não-verbais.

Procedimento

Realizavam-se as sessões experimentais diariamente com duração de aproximadamente uma hora, dependendo do desempenho do indivíduo. O teste podia ser encerrado após 100 tentativas, depois de 10 minutos sem variação de resposta ou ao atingir a duração prevista para a sessão. As sessões ocorriam no período da manhã. Era estipulado um intervalo entre tentativas para permitir que o sujeito pudesse alcançar o reforço. Este intervalo era alterado para se ajustar à necessidade do sujeito. Não havia duração máxima da tentativa.

Para que o sujeito experimental realizasse o teste, ele teve de passar por uma extensa modelagem comportamental composta das seguintes etapas:

Adaptação Inicial

Nesta fase o sujeito era submetido a um primeiro contato com o experimentador e a recompensa utilizada no estudo, pelotas de 190 mg, sabor banana. O sujeito era transportado do viveiro até a câmara experimental. As pelotas eram liberadas por um dispensador automático de pelotas dentro de um comedouro fixo à Câmara experimental. O sujeito passava para a próxima fase, uma vez que o som das pelotas caindo no comedouro fosse estímulo suficiente para fazer com que ele se deslocasse até o comedouro para buscar a pelota.

Adaptação ao Toque na tela

Uma vez adaptado a buscar pelotas, o sujeito recebia pelotas, inicialmente, por se posicionar na abertura do monitor e olhar diretamente para a tela, modelando aos poucos até que ele recebesse pelotas por tocar na tela sensível.

Refinamento do Toque

Nesta etapa eram apresentados alvos com matizes considerados fáceis, ou seja, fora das linhas de confusão previstas para humanos, com luminância fixa de 13cd/m^2 e com saturação máxima em um fundo preto, partindo de uma situação em que o sujeito encontrava-se tocando, indiscriminadamente, na tela sensível e ocorria a liberação do reforço. A frequência da liberação do reforço era reduzida, progressivamente, nas áreas mais distantes do alvo. À medida que o indivíduo, consistentemente, evitasse toques em áreas da tela que não desencadeassem o reforço, diminuía-se a região de tolerância em que ocorria a liberação do reforço. O sujeito só passava para a próxima etapa quando os toques ocorressem somente sobre o alvo.

Treino de Discriminação de Matiz

Nesta etapa iam-se alterando uma a uma as características do estímulo até que o sujeito estivesse adaptado a um estímulo semelhante ao utilizado no teste. Inicialmente, com o toque ocorrendo sobre o alvo, aos poucos ia-se incrementando a luminância da matriz de círculos do fundo até que ficasse igual à do alvo (13cd/m^2), tornando-o discriminável apenas pela diferença de matiz. Ainda com matizes de fácil discriminação em relação ao fundo, a dificuldade da tarefa era aumentada gradualmente, à medida que o sujeito encerrasse com sucesso a sessão, até que a saturação do alvo ia sendo progressivamente alterada de uma distância alvo-fundo máxima $d=0,11$ até a mínima $d=0,020$, nas primeiras sessões. A distância mínima era gradativamente reduzida até $d=0.004$, caso o indivíduo discriminasse o alvo do fundo no valor mínimo. Uma vez que o sujeito não obtivesse acertos consecutivos na distância alvo-fundo mínima nos vetores de treino, por duas sessões consecutivas, encerrava-se a diminuição da distância mínima alvo-fundo e submetia-se o sujeito a uma sessão de simulação de teste, em que se utilizam os critérios do teste apenas com vetores fáceis. Em caso de conclusão da simulação, o sujeito era considerado apto para a fase de teste.

Teste de Visão de Cores

O teste consiste na avaliação do limiar em que o indivíduo conseguia discriminar o alvo do fundo em vinte vetores definidos, ao dividir igualmente a circunferência a partir do ponto central. Os limiares para cada vetor eram obtidos através de um método de escada, no qual erros aumentavam a diferença alvo-fundo e acertos diminuía a mesma. Erros seguidos de acerto e acertos seguidos de erro levam a "reversão" do sentido do teste. Cada vetor é encerrado após onze reversões, e a média das sete últimas reversões é tomada como valor aproximado do limiar de discriminação de matiz para aquele vetor. Em cada sessão avaliava-

se um subconjunto de vetores, dependendo da capacidade do indivíduo de ater-se à tarefa. Durante o teste, o programa apresenta os vetores alternadamente, mantendo uma escada para cada vetor, variando aleatoriamente a posição do alvo em relação ao fundo em uma das nove posições predefinidas e variando a saturação do alvo de acordo com cada etapa da escada. Ao final do teste, era gerado um relatório com todas as tentativas e com os limiares para cada vetor.

RESULTADOS

Avaliação comportamental

O indivíduo albino do gênero *Sapajus* levou dez sessões para atingir o critério de três acertos consecutivos na distância alvo-fundo mínima nos três vetores de treino, após o que foi submetido à simulação de teste. Seus limiares corresponderam a vetores de comprimento $86 \text{ u}'v' \cdot 10^{-4}$, $133 \text{ u}'v' \cdot 10^{-4}$, $89 \text{ u}'v' \cdot 10^{-4}$ respectivamente para os três vetores fáceis utilizados no treino. Tais limiares foram inferiores a distância mínima alvo-fundo usada no treino.

Dever-se-ia prosseguir com a fase de teste, no entanto houve uma interrupção na coleta de dados e o animal não foi submetido aos testes. Quando a coleta foi retomada, o sujeito foi exposto novamente aos parâmetros de treino, para readaptação. Foram necessárias cinco sessões para alcançar novamente o critério. Após esta fase, o sujeito foi submetido a um teste com oito vetores, dos quais quatro estavam na área de confusão esperada para os dois tipos de dicromacia M/L.

Durante a sessão do teste, o animal se mostrou agitado e foi, gradualmente, se desengajando da tarefa até parar de responder totalmente. Isso, provavelmente, ocorreu devido ao número elevado de erros, situação que o sujeito não tinha experimentado durante o treino, em que se deparava com apenas três vetores fáceis. O sujeito foi, imediatamente, exposto a uma sessão com parâmetros de treino, com o intuito de dar a oportunidade de o animal voltar a receber recompensa e produzir reforçadores, mas o indivíduo permaneceu agitado e foi levado de volta para a gaiola-viveiro.

Após esse teste mal sucedido, a resposta de toque ao alvo deteriorou (o indivíduo passou a tocar na periferia do alvo) e o sujeito passou a demonstrar pouco interesse em efetuar toques. Para evitar que o sujeito experimental passasse de uma situação de alta

frequência de recompensa durante o treino, para uma baixa frequência durante o teste, propôs-se o novo procedimento de treino utilizado neste projeto, em sessões iniciais em que o alvo encontra-se em um fundo preto, facilitando sua discriminação e o engajamento na tarefa do toque. O treino passou a ser executado com um protocolo semelhante ao do teste, com o diferencial de ser executado apenas com vetores fáceis e ter a distância mínima reduzida gradativamente, provendo maiores condições de o sujeito experimental adaptar-se à situação do teste. Durante o treino com este novo procedimento, o sujeito albino levou vinte e cinco sessões para reduzir a distância mínima de $d=0.02 \text{ u}'v'*10^{-4}$ até $d=0.004 \text{ u}'v'*10^{-4}$, condição na qual se realizaram os testes com os 20 vetores propostos pelo experimento.

A Tabela 3 exhibe os vetores utilizados no teste e os limiares do *Sapajus* albino para cada vetor. Por limiar compreende-se a média das 7 últimas de 11 reversões observadas durante o teste para cada vetor.

Tabela 3. Limiares descritos pela média das sete últimas reversões (acerto seguido de erro, ou erro seguido de acerto) para os 20 vetores utilizados no experimento e suas coordenadas u' e v' .

Vetor	Limiar	u'	v'
1	112	0.208	0.472
2	59	0.202	0.472
3	84	0.203	0.476
4	72	0.2	0.476
5	79	0.198	0.477
6	84	0.195	0.477
7	129	0.19	0.479
8	88	0.191	0.474
9	373	0.162	0.48
10	439	0.154	0.469
11	169	0.182	0.464
12	135	0.187	0.461
13	59	0.194	0.464
14	129	0.194	0.457
15	71	0.198	0.462
16	130	0.202	0.457
17	118	0.205	0.459
18	156	0.21	0.46
19	710	0.265	0.447
20	373	0.235	0.469

A Figura 15 exibe uma comparação entre os limiares obtidos pelo sujeito experimental comparados a limiares de outros sujeitos Deutan, testados por Goulart e colaboradores (2013).

Figura 15. Comparação entre limiares de discriminação, utilizando os mesmos vetores de teste do Sujeito albino utilizado neste experimento, representado pela linha escura, com outros 7 sujeitos de *Sapajus* sp. com o fenótipo Deutan, testados por Goulart e colaboradores (2013), representados pelas linhas mais claras.

A Figura 16 apresenta os limiares de discriminação de cores obtidos, plotados no diagrama de cromaticidade CIE 1976 $u'v'$. Como diagnóstico pode-se observar que a inclinação do eixo de confusão do indivíduo albino, estimado a partir da linha de tendência na Figura 16 coincide com as linhas de confusão de indivíduos Deutan (Figura 9).

Figura 16. Elipses de discriminação de cor gerada a partir do limiares de discriminação alvo fundo de um *Sapajus* deuteranope testado por Goulart et al. (2013) e do *Sapajus* albino. Cada uma das 20 marcações representa a média das 7 últimas reversões (acerto seguido de erro ou erro seguido de acerto) para cada matiz utilizado no experimento.

Análise Genética

Os aminoácidos das posições 180 (expresso pelo éxon 3), 277 e 285 (ambos expressos pelo éxon 5) foram considerados na inferência do pico de absorbância espectral das opsinas dos primatas, segundo o trabalho de Asenjo et al. (1994). A partir dessa informação, inferiu-se o padrão fenotípico esperado para o sujeito. A Tabela 4 exibe a sequência de aminoácidos para o *Sapajus* albino e sua possível correspondência fenotípica como também a comparação com outros indivíduos do mesmo gênero avaliados pelo mesmo protocolo por Goulart e colaboradores (2013).

Tabela 4. Resultados da análise genética do sujeito albino em comparação com outros indivíduos do mesmo gênero testados por Goulart e colaboradores (2013). A coluna Genótipo mostra o aminoácido encontrado nas posições 180,277 e 285 respectivamente sendo S= serina, A= alanina, Y= tirosina, F= fenilalanina, T= treonina. A coluna λ Max mostra a variação no pico de absorção espectral causada pela mudança da composição dos aminoácidos. A coluna Fenótipo utiliza a nomenclatura usada para humanos a fim de descrever o padrão comportamental esperado para essa combinação de aminoácidos.

Sujeito	Sexo	Genótipo	λ Max (nm)	Fenótipo
Albino	Masculino	SYT	560-563	Dicromata Deuteranope
F1	Fêmea	AFA/AFT	532/542-547	Tricromata
F2	Fêmea	SYT	560-563	Dicromata Deuteranope
M1	Masculino	SYT	560-563	Dicromata Deuteranope
M2	Masculino	SYT	560-563	Dicromata Deuteranope
M3	Masculino	SYT	560-563	Dicromata Deuteranope
M4	Masculino	SYT	560-563	Dicromata Deuteranope
M5	Masculino	SYT	560-563	Dicromata Deuteranope
M6	Masculino	SYT	560-563	Dicromata Deuteranope
M7	Masculino	AFA	532	Dicromata Protanope "Clássico"
M8	Masculino	AFT	542-547	Dicromata Protanope "M/L"

DISCUSSÃO

Pode-se observar na Figura 16 que o desempenho do sujeito albino testado neste experimento é similar ao de outros sujeitos Deutan, testados por Goulart e colaboradores (2013). Perez-Carpinell e colaboradores (1992) também encontraram sujeitos Deutan em humanos albinos, contudo machos de Primatas do Novo Mundo possuem apenas um gene para as opsinas M/L, sendo este resultado o mesmo esperado de indivíduos normais de *Sapajus*. E, apesar de descreverem a existência de três sujeitos protanômalos observada em humanos, neste experimento foi observada visão de cores Deutan no animal albino testado.

Mesmo com nistagmo optoquinético e possivelmente as outras alterações previstas para primatas albinos, hipoplasia foveal e alto cruzamento de fibras visuais (Guillery 1983), o sujeito experimental teve êxito em aprender a tarefa e pôde discriminar cromaticidades distintas apenas pelo matiz.

Por ser um macho de Primatas do Novo Mundo, os resultados dos estudos anteriores com humanos e Primatas do Velho Mundo podem não oferecer uma comparação ideal para avaliar a discriminação de cores. No entanto o desempenho do sujeito experimental quantitativamente semelhante aos outros indivíduos do gênero oferece indícios de que o albinismo não prejudica a visão de cores em *Sapajus sp.*

Portanto a interpretação de Hoffmann e colaboradores (2003) de que os primatas não-humanos albinos teriam padrões semelhantes ao de humanos com albinismo oculomotor, pode estar restrita a Primatas do Velho Mundo, o qual inclui humanos, ou não ser aplicável para *Sapajus*, único gênero avaliado no estudo. Outra interpretação seria de que assim como em humanos, o albinismo não implica necessariamente em problemas de visão de cores para todos indivíduos da espécie. Permanece a necessidade de avaliar indivíduos albinos de outras espécies para compreender melhor o efeito do albinismo em primatas não-humanos.

CONCLUSÕES

- O procedimento de teste desenvolvido neste experimento se mostrou eficaz para modelar e treinar indivíduos não-verbais para a realização de testes comportamentais, envolvendo discriminação de estímulos simples.
- O *Sapajus* albino testado neste experimento possui visão de cores classificada como Deuteranope, resultado obtido através da avaliação comportamental e genética, sendo o desempenho do *Sapajus* albino similar à de outros sujeitos experimentais do mesmo gênero.
- A adaptação do *Cambridge Colour Test* feita por Goulart e colaboradores (2013) já validada para avaliar a visão de cores de primatas não humanos também foi eficaz para avaliar um sujeito albino, apesar dos problemas associados a esta condição como a fotofobia.

REFERÊNCIAS

- Asenjo, A. B., Rim, J., & Oprian, D. D. (1994). *Molecular determinants of human red/green Colour discrimination*. *Neuron*, 12, 1131–1138.
- Auricchio, P., (1995) *Primatas do Brasil*. Projeto Editorial UnG. Terra Brasilis Editora Ltda, São Paulo, 168p.
- Birch J. (2001) *Diagnosis of Defective Color Vision*. Second edition. Butterworth-Heinemann, United Kingdom, Edinburgh
- Bonci, D. M. O. (2011). *Estudo dos pigmentos visuais de macaco-prego (Cebus sp) e da relação entre a psicofísica e a genética da visão de cores em humanos*. Tese de Doutorado, Instituto de Psicologia, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Buck S. L., Knight R., Fowler G., Hunt B. (1998) *Rod influence on hue-scaling functions*. *Vis. Res.* 38, 3259–3263.
- Castelo-Branco, M., Faria, P., Forjaz, V., Kozak, L.R. & Azevedo, H. (2004). *Simultaneous comparison of relative damage to chromatic pathways in ocular hypertension and glaucoma: Correlation with clinical measures*. *Ophthalmology and Visual Science* 45, 499–505.
- Comissão Internacional de Iluminação(CIE) (2011) Colour (perceived) In ILV: International Lighting Vocabulary (p. 28)
- Dain, S. J. (2004). *Clinical colour vision tests*. *Clinical & experimental optometry*. Journal of the Australian Optometrical Association, 87(4-5), 276–93.
- De Valois, R. L., & De Valois, K. K. (1993). *A multi- stage color model*. *Vision Research*, 33, 1053–1065.
- Dominy, N. J., & Lucas, P. W. (2001). *Ecological importance of trichromatic colour vision to primates*. *Nature*, 410, 363–365.
- Dominy, N. J., Garber, P. A., Bicca-Marques, J. C., & Azevedo-Lopes, M. A. D. (2003). *Do female tamarins use visual cues to detect fruit rewards more successfully than do males?* *Animal Behaviour*, 66, 829–837.
- Feitosa-Santana, C. (2005). *Reconstrução do espaço de cores de pacientes com discromatopsia adquirida: diabéticos tipo 2 e intoxicados por vapor de mercúrio*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Psicologia, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Gilad, Y., Wiebe, V., Przeworski, M., Lancet, D., & Pääbo, S. (2004). *Loss of olfactory receptor genes coincides with the acquisition of full trichromatic vision in primates*. *PLoS biology*, 2(1)

- Goulart, P. R. K., Bandeira, M. L., Tsubota, D., Oiwa, N. N., Costa, M. F. & Ventura, D. F. (2008). *A computer-controlled color vision test for children based on the Cambridge Colour Test*. Visual Neuroscience, 25, 445-450.
- Goulart, P.R.K., Bonci, D.M.O., Galvão O.F., Silveira L.C.L., Ventura D.F. (2013) *Color Discrimination in the Tufted Capuchin Monkey, Sapajus spp.* PLoS ONE 8(4)
- Gouras, P. (1991). *The history of colour vision*. In *Vision and visual dysfunction*. Gouras P. editor, Cronly-Dillon editor geral. The Macmillan Press LTD, volume 6.
- Guillery R.W., Hickey T.L., Kaas J.H., Felleman D.J., Debruyn E.J., Sparks D.L. (1984). *Abnormal central visual pathways in the brain of an albino green monkey (Cercopithecus aethiops)*. J Comp Neurol 226:165–183
- Hiramatsu, C., Radlwimmer, F. B., Yokoyama, S., & Kawamura, S. (2004). *Mutagenesis and reconstitution of middle-to-long-wave-sensitive visual pigments of New World monkeys for testing the tuning effects of residues at sites 229 and 233*. Vision Research, 44, 225–2231
- Hoffmann, M., & Tolhurst, D. (2003). *Organization of the visual cortex in human albinism*. J Neurosci., 23(26):8921-30.
- Hunt, D. M., Dulai, K. S., Cowing, J. a, Julliot, C., Mollon, J. D., Bowmaker, J. K., Li, W. H., et al. (1998). *Molecular evolution of trichromacy in primates*. Vision research, 38(21), 3299–306.
- Hunt, D. M., Williams, A. J., Bowmaker, J. K., & Mollon, J. D. (1993). *Structure and evolution of the polymorphic photopigment gene of the marmoset*. Vision Research, 33(2), 147-154.
- Jacobs, G. H. (1996). *Primate photopigments and primate color vision*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 93(2), 577–81
- Jacobs, G. H., Neitz, M., Deegan, J. F., & Neitz, J. (1996b). *Trichromatic color vision in New World monkeys*. Nature, 382(7), 156–8.
- Jacobs, G. H., & Deegan, J. F. (2003). *Cone pigment variations in four genera of new world monkeys*. Vision research, 43(3), 227–36.
- Jacobs, G.H. (2004). *Comparative color vision*. The Visual Neurosciences, Vol. 2, ed. Chalupa, L. & Werner, J.S., pp. 962–973. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Jacobs, G. H. (2008). *Primate color vision: a comparative perspective*. Visual neuroscience, 25(5-6), 619–33.
- Jacobs, G. H. (2009). *Evolution of colour vision in mammals*. Phil. Trans. R. Soc (364), pp. 2957-2967.
- Kawamura, S., Hirai, M., Takenaka, O., Radlwimmer, F. B., & Yokoyama, S. (2001). *Genomic and spectral analyses of long to middle wavelength-sensitive visual pigments of common marmoset (Callithrix jacchus)*. Gene, 269, 45–51

- Kinnear, P. E., Jay, B., & Witkop, C. J. (1985). *Albinism*. Survey of ophthalmology, 30(2), 75–101.
- Levine, M.W. (2000) *Fundamentals of Sensation and Perception*, 3rd ed. New York: Oxford University Press.
- Lynch A.J.W, Silva J.S Jr, Rylands A.B. (2012) *How different are robust and gracile capuchins monkeys? An argument for the use of Sapajus and Cebus*. American Journal of Primatology 74: 273–286. doi: 10.1002/ajp.22007.
- Mancuso, K., Neitz, M., & Neitz, J. (2006). *An adaptation of the Cambridge Colour Test for use with animals*. Visual neuroscience, 23(3-4)
- McCardle, H. (2012). *Albinism In Wild Vertebrates* Dissertação de Mestrado, Texas State University, San Marcos
- Mollon, J. D., & Reffin, J. P. (1989). *A computer-controlled colour vision test that combines the principles of Chibret and Stilling*. Journal of Physiology, 414, 5P.
- Mollon, J. D., & Regan, J. P. (2000). *Handbook of the Cambridge Colour Test*. Ed: Cambridge Research Systems, London, UK. <www.crs Ltd.com>
- Nathans, J., Piantanida, T. P., Eddy, R. L., Shows, T. B., & Hogness, D. S. (1986). *Molecular genetics of inherited variation in human color vision*. Science(Washington), 232(4747), 203–203.
- Neitz, M., Neitz, J., & Jacobs, G. H. (1991). *Spectral tuning of pigments underlying red-green color vision*. Science (New York, N.Y.), 252(5008), 971–4.
- Osorio, D., & Vorobyev, M. (1996). *Colour vision asan adaptation to frugivory in primates*. Proceedings: Biological Science, 263(1370), 593-599
- Perez-Carpinell, J. (1992). *Vision defects in albinism*. Optom Vis Sci.,69(8):623-8.
- Regan, B. C., Julliot, C., Simmen, B., Viénot, F., Charles-Dominique, P., & Mollon, J. D. (2001). *Fruits, foliage and the evolution of primate colour vision*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, Biological Sciences, 356(1407), 229-283
- Regan, B. C., Reffin, J. P. & Mollon, J. D. (1994). *Luminance noise and the rapid determination of discrimination ellipses in colour deficiency*. Vision Research, 34, 1279-1299.
- Rushton, B. Y. W. A. H. (1972). *Pigments and Signals in Colour Vision*. J. Physiol, 220, 1–31.
- Schwartz, S. H. (2004). *Visual Perception – a clinical orientation*. (3rd ed.). Hightstown: McGraw Hill.
- Smith, A. C., Buchanan-Smith, H. M., Surridge, A. K., Osorio, D., & Mundy, N. I. (2003). *The effect of colour vision status on the detection and selection of fruits by tamarins (Saguinus spp.)*. The Journal of Experimental Biology, 206 (Pt 18), 3159-3165.

- Soares, J. G., Fiorani, M., Araújo, E. A., Zana, Y., Bonci, D. M. O., Neitz, M., Ventura, D. F., & Gattass, R. (2010). *Cone photopigment variations in Cebus apella monkeys evidenced by electroretinogram measurements and genetic analysis*. *Vision Research*, 50, 99–106.
- Summers, C. (1996). *Vision in albinism*. *Trans Am Ophthalmol Soc*.94: 1095–1155.
- Surridge, A. K., & Mundy, N. I. (2002). *Trans-specific evolution of opsin alleles and the maintenance of trichromatic colour vision in Callitrichineprimates*. *Molecular Ecology*, 11, 2157–2169
- Ventura, D.F., Gualtieri, M., Oliveira, A.G.F., Costa, M.F., Quiros, P., Sadun, F., de Negri, A.M., Salomao, S.R., Berezovsky, A., Sherman, J., Sadun, A.A. & Carelli, V. (2007). *Male prevalence of acquired color vision defects in asymptomatic carriers of Leber's hereditary optic neuropathy*. *Investigative Ophthalmology and Visual Science* 48, 2362–2370.
- Williams, A. J., Hunt, D. M., Bowmaker, J. K., & Mollon, J. D. (1992). *The polymorphic photopigments of the marmoset: spectral tuning and genetic basis*. *The EMBO Journal*, 11(6):2039-45.
- Yokoyama, S., & Radlwimmer, F. B. (1999). *The molecular genetics of red and green Colour vision in mammals*. *Genetics*, 153(2), 919-932.

GLOSSÁRIO²

Absorção

Processo em que a energia radiante é convertida em uma forma diferente de energia ao interagir com a matéria.

Bastonetes

Fotorreceptores da retina que contêm pigmentos sensíveis à luz, capazes de iniciar o processo de visão escotópica.

Brilho

Atributo da percepção visual relativo a uma área que parece emitir, ou refletir, mais ou menos luz

NOTA: O uso deste termo não é restrito a fontes primárias de luz.

Comprimento de onda

Distância em direção da propagação de uma onda periódica entre dois pontos sucessivos na mesma fase.

Unidade: m

NOTA: Em radiações ópticas as unidades utilizadas são geralmente "nm" ou "μm"

Cone

Fotorreceptores na retina que contêm pigmentos sensíveis à luz, capazes de iniciar o processo de visão fotópica.

Cor

1. (percebida), Cor: ver Cor percebida.

2. (psicofísica), Cor: especificação de um estímulo colorido em termo de valores operacionalmente definidos, como três valores tri-estímulo.

Cor (percebida)

Característica da percepção visual que pode ser descrita pelos atributos: Matiz, Brilho (ou luminosidade) e Saturação (ou chroma).

NOTA: Quando necessário para evitar confusão, o termo 'cor percebida' pode ser usado no lugar de cor.

NOTA: Cor percebida depende da distribuição espectral do estímulo colorido, do tamanho, forma, estrutura e da área ao redor da área do estímulo, do estado de adaptação do sistema visual do observador, da experiência prévia do observador e de situações similares à a situação da observação.

Cor do objeto

A cor percebida como propriedade de um objeto.

Cromaticidade

Propriedade de um estímulo colorido definido pelo conjunto de seu comprimento de onda primário ou complementares e sua pureza de cor.

Defeitos de visão de cores

Anomalia visual em que há uma redução na habilidade de discriminar algumas ou todas as cores.

² Glossário adaptado de ILV: International Lighting Vocabulary, Comissão Internacional de Iluminação (CIE) (2011) .

Deutan

Adjetivo que denota deuteranopia ou deuteranomia.

Deuteranomalia

Defeito de visão de cores em que a discriminação de conteúdo de cores no eixo verde-vermelho é reduzida.

Deuteranopia

Defeito de visão de cores em que a discriminação de conteúdo de cores no eixo verde-vermelho é ausente.

Dicromacia

Defeito na visão de cores em que todas as cores podem ser obtidas por meio da mistura aditiva de apenas dois estímulos luminosos.

Eficácia luminosa espectral

Razão do fluxo radiante de um comprimento de onda λ_m em relação ao comprimento de onda λ de forma que ambos desencadeiem sensações de intensidade luminosas iguais sob as mesmas condições fotométricas e λ_m é escolhido de forma que o valor máximo da razão é igual a 1.

Espaço de cor

Representação geométrica de variações cromáticas, usualmente em três dimensões.

Espectral

Adjetivo que, quando aplicado à quantidade X de uma radiação eletromagnética, indica: ou X é uma função do comprimento de onda λ , fórmula: $X(\lambda)$ ou que a quantidade à que se refere é a concentração espectral de X , fórmula: $X_\lambda = \frac{dX}{d\lambda}$.

Estímulo monocromático

Estímulo que consiste de radiação monocromática.

Fóton

Quantum de radiação eletromagnética considerado uma partícula de energia $h\nu$, onde h é a constante de Planck e ν é a frequência da radiação.

Fóvea

Parte central da retina, fina e achatada, contendo quase exclusivamente cones e formando o sítio com a visão mais acurada.

Luz

1. Característica de todas sensações e percepções específicas da visão.
2. Radiação que é capaz de excitar o sistema visual humano.

NOTA: Este termo tem 2 sentidos distintos. Para evitar confusão pode-se utilizar o termo luz percebida para o primeiro sentido.

NOTA: A luz é normalmente, mas nem sempre, percebida como resultado da ação de um estímulo luminoso no sistema visual

Luminância

Medida fotométrica da intensidade luminosa por unidade de área a um determinado ângulo.

Matiz

Atributo da percepção visual em que uma área é similar a uma das cores: azul, verde e vermelho, ou uma combinação de pares adjacentes dessas cores quando consideradas em formato de anel.

Monocromacia

Defeito na visão de cores em que todas as cores podem ser obtidas por apenas um estímulo luminoso.

Protan

Adjetivo que denota protanotopia ou protanomalia.

Protnomalia

Defeito de visão de cores em que a discriminação de conteúdo de cores no eixo verde-vermelho é reduzida.

Protanotopia

Defeito de visão de cores em que a discriminação de conteúdo de cores no eixo verde-vermelho é ausente.

Radiação monocromática

Radiação caracterizada por uma única frequência.

NOTA: Na prática, a radiação de um grupo bem pequeno de frequências pode ser descrita como uma frequência única

Radiação visível

Qualquer radiação óptica capaz de causar diretamente uma sensação visual.

NOTA: Não há um limite preciso do alcance espectral da radiação visível uma vez que depende da quantidade de energia radiante que chega a retina e da responsividade do observador. O limite inferior é geralmente entre 360 nm e 400 nm e o superior entre 760 nm e 830 nm

Retina

Membrana localizada no fundo do olho que é sensível a estímulos luminosos.

Saturação

Proporção da pureza de cor de uma área em proporção ao seu brilho.

Tricromacia anomala

Forma de tricromacia em que a discriminação de cores é menor do que a normal.

Tritan

Adjetivo que denota tritanotopia ou tritanomia.

Tritanomalia

Defeito de visão de cores em que a discriminação de conteúdo de cores no eixo azul-amarelo é reduzida.

Tritanotopia

Defeito de visão de cores em que a discriminação de conteúdo de cores no eixo azul-amarelo é ausente.

Visão escotópica

Visão de um olho normal em que os bastonetes são os principais fotoreceptores ativos.

NOTA: A visão escotópica ocorre normalmente quando o olho está adaptado a níveis de luminância de pelo menos de $\sim 10^{-3} \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$

NOTA: Em comparação com a visão fotópica, a visão escotópica é caracterizada por não ter percepção de cores e por uma mudança da sensibilidade visual em direção a comprimentos de onda mais curtos

Visão fotópica

Visão de um olho normal em que os cones são os principais fotoreceptores ativos.

NOTA: A visão fotópica ocorre normalmente quando o olho está adaptado a níveis de luminância de pelo menos $5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$

NOTA: A percepção de cores é típica da visão fotópica