

# UMA FERRAMENTA ADAPTATIVA PARA FACILITAR A VISUALIZAÇÃO DE IMAGENS PARA PESSOAS PORTADORAS DE DALTONISMO

**Trabalho de Conclusão de Curso**

**Engenharia da Computação**

**Jinmi Lee**

**Orientador: Prof. Wellington Pinheiro dos Santos**

**Recife, junho de 2008**



UNIVERSIDADE  
DE PERNAMBUCO

# UMA FERRAMENTA ADAPTATIVA PARA FACILITAR A VISUALIZAÇÃO DE IMAGENS PARA PESSOAS PORTADORAS DE DALTONISMO

**Trabalho de Conclusão de Curso**

**Engenharia da Computação**

Este Projeto é apresentado como requisito parcial para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia da Computação pela Escola Politécnica de Pernambuco – Universidade de Pernambuco.

**Jinmi Lee**  
**Orientador: Prof. Wellington Pinheiro dos Santos**

**Recife, junho de 2008**



UNIVERSIDADE  
DE PERNAMBUCO

Jinmi Lee

**UMA FERRAMENTA ADAPTATIVA  
PARA FACILITAR A VISUALIZAÇÃO  
DE IMAGENS PARA PESSOAS  
PORTADORAS DE DALTONISMO**

## Resumo

O daltonismo é um distúrbio visual cromático que afeta aproximadamente 8% dos homens. Esta parcela da população possui a dificuldade de distinguir algumas cores que pessoas com sensibilidade cromática considerada normal distinguiriam com facilidade. Os portadores de distúrbios cromáticos estão cada vez mais em desvantagem nas atividades que necessitam de comparações mais refinadas de cores, com associação de padrões e discriminação de tonalidades intermediárias, pois, uma porção importante da informação visual desaparece quando vista por portadores de daltonismo. Desta forma, o daltonismo muitas vezes apresenta-se como um obstáculo ao uso efetivo do computador que, atualmente, utiliza cada vez mais recursos gráficos nas suas interfaces e na sua comunicação visual. Neste trabalho, três ferramentas computacionais foram desenvolvidas com a finalidade de aumentar a acessibilidade dos portadores de daltonismo. A primeira dessas ferramentas tem o intuito de testar o daltonismo, além de avaliar o seu grau de severidade. A segunda ferramenta é adaptativa, baseada em Lógica Fuzzy, e propõe um método de correção de imagens digitais para melhorar a qualidade visual dos portadores de distúrbios cromáticos. A terceira ferramenta destina-se à simulação dos daltonismos vermelho e verde. Por fim, foram realizados testes com os resultados da proposta de correção utilizando o simulador e um grupo de portadores de daltonismo.



## **Abstract**

Approximately 8% of men are affected by color blindness, a color vision disorder. This portion of population has difficulty in distinguishing certain colors that people with colour sensitivity considered normal are able to easily distinguish. People with colour disorders are at a disadvantage in activities that require more refined comparisons with color combination and intermediate shades discrimination patterns, because an important portion of visual information disappears when viewed by a color blind. Thus, color blindness often presents itself as an obstacle to effective use of computers, which currently employ more resources in its graphical interfaces and in its visual communication. In this work, three computational tools were developed with the purpose of increasing the accessibility of people with a color vision disorder. The goal of the first of these tools is to test the color blindness and assess its severity. The second tool is adaptive, based on Fuzzy Logic, and proposes a method for correction of digital images to improve visual quality for individuals with colour vision disturbances. The third tool intends to simulate red and green color blindness. Finally, tests with a group of color blind individuals were conducted to evaluate the results proposed by the simulator.

# Sumário

<b>Índice de Figuras</b>	<b>iv</b>
<b>Índice de Tabelas</b>	<b>vi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>8</b>
1.1 Objetivos Gerais e Específicos	9
1.2 Organização do Trabalho	9
<b>2 Sistema Visual Humano</b>	<b>10</b>
2.1 Introdução	10
2.2 Visão em Cores	12
2.2.1 Modelos de Cores	12
2.3 Daltonismo	14
2.3.1 Diagnóstico dos Tipos de Daltonismo	16
2.3.2 Daltonismo e Acessibilidade	18
<b>3 Lógica Fuzzy</b>	<b>21</b>
3.1 Introdução	21
3.2 Teoria dos Conjuntos Fuzzy	22
3.3 Funções de Pertinência	22
3.4 Álgebra de Conjuntos	24
3.4.1 Definições Clássicas	24
3.4.2 Definições Fuzzy	25
3.5 Controlador Fuzzy	26
3.5.1 Variável Lingüística	26
3.5.2 <i>Fuzzificação</i>	26
3.5.3 Base de Conhecimento	27
3.5.4 Máquina de Inferência	27
3.5.5 <i>Defuzzificação</i>	27
<b>4 Experimentos e Resultados</b>	<b>28</b>
4.1 Ferramenta de Teste de Daltonismo	28
4.1.1 Desenvolvimento	29
4.1.2 Funcionamento	30
4.2 Ferramenta de Simulação do Daltonismo	31
4.2.1 Algoritmo de Simulação	31
4.2.2 Funcionamento	32
4.3 Ferramenta de Correção	33
4.3.1 Método de Correção Proposto	33
4.3.2 Resultados e Discussões	36
<b>5 Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>49</b>
5.1 Trabalhos Futuros	50

# Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b>	Olho humano em um corte transversal.....	10
<b>Figura 2.</b>	Diferença estrutural entre cones e bastonetes [10].....	11
<b>Figura 3.</b>	Espectro de luz visível. ....	12
<b>Figura 4.</b>	Sólido de cores, representando o modelo RGB [12].....	13
<b>Figura 5.</b>	Modelo HSI: (a) Representação gráfica do modelo. (b) Variação dos parâmetros no modelo HSI [12]. ....	14
<b>Figura 6.</b>	Efeitos dos diversos tipos de dicromatismo. Em (a) a imagem original, em (b) efeitos da protanopia, em (c) da deuteranopia e em (d) da tritanopia. ....	15
<b>Figura 7.</b>	Pranchas de Ishihara: (a) Prancha de demonstração, (b) Prancha escondida, (c) Prancha mascarada e (d) Prancha de diagnóstico. ....	18
<b>Figura 8.</b>	Representações dos conjuntos: tradicional (a) com fronteiras bem definidas e Fuzzy (b) com fronteiras nebulosas. ....	22
<b>Figura 9.</b>	Função de pertinência $\mu_G$ da nota do indivíduo $x$ ao conjunto solução das notas aceitáveis $G$ . ....	23
<b>Figura 10.</b>	Ilustração em blocos do controlador Fuzzy proposto por Mamdani.....	26
<b>Figura 11.</b>	Exemplo do código XML descrevendo a estrutura de dados da ferramenta DaltonTest. ....	30
<b>Figura 12.</b>	Tela da Ferramenta de Teste apresentando uma prancha pseudoisocromática de demonstração.....	30
<b>Figura 13.</b>	Telas da Ferramenta de Simulação. (a) Janela para definição dos parâmetros de simulação. (b) Janela de visualização dos resultados da simulação. ....	32
<b>Figura 14.</b>	Resultado da simulação de dicromatismos. (a) Imagem original RGB, visão normal. (b) Imagem RGB simulando o daltonismo do tipo protan. (c) Imagem RGB simulando o daltonismo do tipo deutan. ....	33
<b>Figura 15.</b>	<i>Fuzzificação</i> dos resultados obtidos através da Ferramenta de Teste.....	35
<b>Figura 16.</b>	Tela principal da Ferramenta de Correção.....	36
<b>Figura 17.</b>	Tela de visualização das imagens corrigidas. ....	36
<b>Figura 18.</b>	Resultado da correção de imagem utilizando o método em RGB. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo protan. ....	37
<b>Figura 19.</b>	Resultado da correção de imagem utilizando o método em LMS. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo protan. ....	38
<b>Figura 20.</b>	Resultado da correção de imagem utilizando o método em RGB. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo protan. ....	38
<b>Figura 21.</b>	Resultado da correção de imagem utilizando o método em LMS. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo protan. ....	39
<b>Figura 22.</b>	Resultado da correção de imagem utilizando o método em RGB. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo protan. ....	39
<b>Figura 23.</b>	Resultado da correção de imagem utilizando o método em LMS. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo protan. ....	40



# Índice de Tabelas

<b>Tabela 1.</b>	Incidência do daltonismo dentro das suas variações em homens e mulheres. ....	16
<b>Tabela 2.</b>	Representação tabular da distribuição de pesos da ferramenta DaltonTest, onde RE = Resposta Esperada, P = Peso, PP = Peso para Protanomalia, PD = Peso para Deuteranomalia, Protan = Protanomalia, Deutan = Deuteranomalia, Mono = Monocromatismo, '*' = Resposta em branco e '-' = Campos que não se aplicam.....	29
<b>Tabela 3.</b>	Representação em RGB das cores nos casos absolutos de daltonismo.....	34
<b>Tabela 4.</b>	Resultado da análise dos filtros de correção. ....	47

# Agradecimentos

Antes de tudo, agradeço à minha família, em especial aos meus amados pais, Prof. Lee e Sonia, que são meus principais incentivadores. Agradeço por todo o apoio, carinho e paciência durante a faculdade e durante todos os momentos da minha vida. Agradeço à minha única irmã, Sonmi, por sua compreensão com minha constante falta de tempo e de paciência.

Ao melhor namorado, amigo e colega de turma, Felipe. Agradeço por sempre me lembrar que eu posso fazer algo cada vez melhor e por nunca ter me negado ajuda quando eu precisei. Agradeço por ser dele o melhor ombro e as melhores verdades. Obrigada por estar ao meu lado sempre. Agradeço à Flávia e a Sr. Domingos por todo o carinho que me foi dado até hoje.

A Vinícius, por sempre ter sido um ótimo amigo e por nunca ter me decepcionado, a Ricardo, por me mostrar que com equilíbrio e paciência conseguimos muita coisa e a todos os amigos conquistados durante esses anos na POLI que não estão aqui citados mas que possuem um lugar muito importante na minha história.

A Valdênio, por nunca medir esforços para conseguir um livro que eu precisava, a Felipe e Thiago que sempre estavam prontos pra me ouvir e pra me fazer morrer de rir, a Nowasky por me fazer pensar mais racionalmente e pelos chocolates em momentos de stress, a Mano, por seu perfeccionismo e humor sarcástico. Talita, Ed, Renatinha e Macedo, por se preocuparem comigo e pelas inúmeras ajudas. E a todos os que trabalham comigo e que contribuem com meu crescimento pessoal e profissional, muito obrigada.

Aos professores do DSC, que sempre foram exemplos de profissionalismo e ética. Em especial, agradeço ao professor Wellington Pinheiro, pela sua orientação impecável e brilhante. Obrigada pela sua atenção, dedicação e por confiar em mim.

Obrigada a todos os portadores de daltonismo que me ajudaram a concluir este trabalho.

Por fim, agradeço a todos que compartilharam comigo os bons e difíceis momentos dessa minha instigante e fantástica jornada no curso de Engenharia da Computação.

# Capítulo 1

## Introdução

Milhares de anos de evolução tornaram o sistema visual um dos mais importantes sistemas sensoriais do ser humano, dado o seu desenvolvimento, complexidade e capacidade de identificação de objetos e situações, considerando tanto aspectos objetivos quanto subjetivos. Enquanto para os animais irracionais o sistema visual se mostra de importância candente para sua própria sobrevivência, a importância deste sistema para o ser humano, dado o seu nível de civilização, se mostra na capacidade de se instrumentalizar para o desenvolvimento do pensamento, do aprendizado e da comunicação interpessoal [1] [2].

O daltonismo é um distúrbio visual cromático também conhecido como discromatopsia ou discromopsia. Esta deficiência na percepção caracteriza-se por reduzir, parcialmente ou completamente, a capacidade de distinguir algumas cores e afeta aproximadamente 8% da população masculina e 0,4% da população feminina. Essa parcela da população obtém um menor sucesso em atividades onde a cor é o seu principal atributo ou encontra dificuldades em realizar tarefas simples, como ver um mapa ou distinguir códigos coloridos em uma legenda [3] [4].

Um portador de daltonismo, muitas vezes, vive anos sem perceber que possui uma deficiência visual cromática. A razão disto é que o distúrbio pode apresentar-se em diferentes intensidades. Com a popularização de novas tecnologias e o aumento da interação do usuário através de interfaces gráficas, problemas relacionados à distinção das cores tornaram-se mais evidentes, muitas vezes, restringindo o uso de algumas aplicações.

Cerca de vinte métodos de diagnóstico de daltonismo são comumente utilizados e estes podem ser classificados em subjetivos ou objetivos. Pertence aos métodos subjetivos, mais especificamente aos testes de discriminação, o teste de daltonismo mais conhecido e utilizado no mundo: o teste de Ishihara. Apesar do avanço relacionado aos métodos de diagnóstico dos distúrbios visuais, ainda não existe um teste que englobe todos os possíveis casos e forneça um resultado exato sobre o problema. Apesar disto, um diagnóstico precoce aumentaria a qualidade de vida dos portadores de distúrbios como o daltonismo [5] [6].

A evolução da tecnologia de computação digital e o processamento digital de imagens em uma de suas áreas de aplicação (*melhoria de informação visual para a interpretação humana*) têm possibilitado a melhora da qualidade visual de imagens digitais para pessoas que possuem algum tipo de perturbação da percepção das cores. Contudo, a maioria das aplicações que procuram diminuir os efeitos do daltonismo não considera que este distúrbio pode ocorrer em graus variados, diferenciando-se de pessoa pra pessoa [7].

A Lógica Fuzzy possui inúmeras vantagens, dentre elas representar incertezas, conhecimentos imprecisos e situações ambíguas onde não é possível a utilização da lógica

Booleana, o uso de variáveis lingüísticas, o que aproxima do pensamento humano, necessidade de poucas regras e valores, além da robustez, pois não requer entradas precisas. E, dessa forma, demonstra ser uma ótima ferramenta para lidar com os diferentes graus de daltonismo encontrados.

O interesse em filtros que melhorem a qualidade visual de portadores de daltonismo surgiu da necessidade da customização dos mesmos. Muitas vezes as imagens sofrem alterações de cor e contraste de forma desnecessária, pois não há uma adaptação à deficiência do usuário que faz uso da aplicação. O diferencial de se utilizar um filtro adaptativo está no diagnóstico do problema e na utilização de Lógica Fuzzy para tornar o filtro mais adequado ao grau de daltonismo do usuário.

## 1.1 Objetivos Gerais e Específicos

Este trabalho tem como objetivo geral o estudo das anomalias cromáticas visuais do sistema visual humano e o desenvolvimento de ferramentas computacionais para adaptabilidade de interfaces humano-máquina, proporcionando a inclusão dos indivíduos portadores de daltonismo e gerando mais soluções de acessibilidade.

Como objetivos específicos, neste trabalho procurou-se desenvolver uma ferramenta de simulação de daltonismo a partir da codificação das imagens digitais em RGB e LMS e da aplicação de matrizes de transformação linear que modelam a ausência ou deficiência dos cones responsáveis pela sensibilidade às frequências baixas, médias e altas.

Também procurou-se desenvolver uma ferramenta de teste de daltonismo e avaliação do grau de daltonismo, utilizando uma abordagem baseada em Lógica Fuzzy, o que resultou numa importante contribuição à área. Um outro objetivo específico foi o desenvolvimento de uma ferramenta adaptativa para melhorar a qualidade visual de imagens digitais para pessoas portadoras de daltonismo. Esta solução integrada engloba desde os testes para o diagnóstico do tipo de distúrbio para as cores, avaliando em que grau ele se apresenta até a visualização da imagem com as correções que procuram diminuir os efeitos do daltonismo.

## 1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado da forma que segue:

O Capítulo 2 apresenta os principais aspectos relativos ao sistema visual humano, como a anatomia e o funcionamento dos olhos, além de englobar conceitos sobre a visão em cores abrangendo seus distúrbios de percepção da cor e testes de diagnóstico.

O Capítulo 3 define Lógica Fuzzy e introduz a fundamentação teórica necessária para o entendimento deste trabalho.

O Capítulo 4 descreve o desenvolvimento e funcionamento das ferramentas de: Teste, Simulação e Correção. Nesse Capítulo, são encontrados os experimentos que envolvem a correção da imagem, baseada no resultado obtido com a Ferramenta de Teste e avaliações utilizando métodos de simulação e testes diretos com portadores de daltonismo.

O Capítulo 5 exhibe as conclusões deste trabalho, detalhando suas principais contribuições, comenta algumas dificuldades encontradas e discute propostas de trabalhos futuros.

O Apêndice A apresenta o formulário de avaliação das imagens geradas pela Ferramenta de Correção.



# Capítulo 2

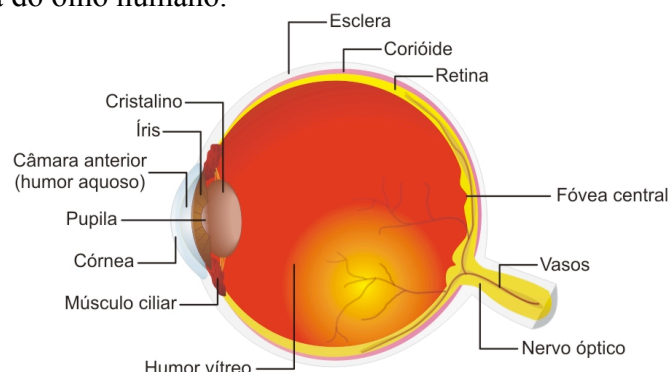
## Sistema Visual Humano

### 2.1 Introdução

O sistema visual humano, devido ao seu desenvolvimento e complexidade, pode ser considerado um dos mais importantes e eficientes sistemas de percepção do ser humano. Para muitos animais, a visão é apenas um elemento que torna sua sobrevivência possível. Contudo, para o homem, é um instrumento de desenvolvimento do pensamento, do aprendizado e de comunicação entre outros seres humanos. É através da visão que é possível ver e entender os diversos elementos de um ambiente [1] [2].

Fazem parte do sistema visual humano os bulbos do olho, ou olhos, como são popularmente chamados, além dos nervos ópticos e do cérebro. Os olhos são órgãos sensoriais da visão e transformam a luz em um sinal neuronal: os nervos ópticos transportam esse sinal até o cérebro, que os processa, decodifica e extrai informações. O local do cérebro onde ocorre essa percepção visual é o córtex occipital, responsável pela interação dessa percepção com outras informações. Os locais responsáveis pela compreensão do que se vê são os córtices parietais e temporais. A visão não só inclui a habilidade de detectar luz e imagens, mas também conduz o processo de interpretá-las [8].

O bulbo, que é aproximadamente esférico, fica acondicionado dentro de uma cavidade óssea. Sua parede é formada por três camadas de tecido: esclera, coriósio e retina, sendo que esta última reveste internamente a camada ocular [9]. A Figura 1 representa um esboço dos principais elementos da anatomia do olho humano.



**Figura 1.** Olho humano em um corte transversal.

Nos olhos, mais especificamente na retina, é que estão localizadas as células sensoriais especializadas na captação de estímulos luminosos: os fotorreceptores ou fotorreceptores. A estrutura do olho é voltada para, de certa forma, alimentar a retina, dar-lhe sustentação, forma e ajudar seu desempenho. A retina divide-se em uma parte atrófica, que é insensível à luz, e em uma parte sensorial, em que estão localizados os fotorreceptores; estes representam o primeiro neurônio da organização sensorial visual.

A parte sensorial se subdivide em uma porção periférica e em uma porção central. Na porção periférica, predominam os fotorreceptores, conhecidos como bastonetes, e na porção central, onde são mais abundantes, os fotorreceptores conhecidos como cones. A Figura 2 exibe a diferença estrutural existente entre os cones e os bastonetes.



**Figura 2.** Diferença estrutural entre cones e bastonetes [10].

Os fotorreceptores possuem pigmentos sensíveis à luz, chamados de rodopsina nos bastonetes e de iodopsina nos cones. Esses pigmentos, quando se decompõem em uma proteína opsina e num carotenóide, desencadeiam alterações do potencial elétrico celular que são transmitidas por ondas de despolarização, seguidas de repolarização de membranas de axônios, como sinais neurais.

Existem em torno de 120 milhões de bastonetes e 6 milhões de cones. Os cones se encontram mais concentrados em uma região da retina chamada fôvea. Os bastonetes possuem uma característica escotópica, ou seja, têm alta sensibilidade acromática à luz. Isto quer dizer que os bastonetes não possuem a capacidade de distinguir as cores, além de ter uma baixa capacidade resolutive. Eles são estimulados em ambientes com pouca luminosidade, onde tornam possível a visão de objetos. Já os cones possuem a característica fotópica: são menos sensíveis à luz, mas são capazes de discriminar diferentes comprimentos de onda, possibilitando a visão em cores. Quando há um aumento da luminosidade, os cones são estimulados e a percepção das cores se torna possível [8] [9].

## 2.2 Visão em Cores

Há três tipos diferentes de cones no olho humano, cada um contendo um tipo de pigmento fotossensível. Estes pigmentos são proteínas conjugadas em que a parte não-protéica é o retineno (dehidroretinaldeído), derivado da vitamina A, e a parte protéica é uma opsina. Cada classe de cone possui uma opsina diferente, determinada geneticamente; um tipo detecta luz vermelha, outro detecta luz verde e o terceiro detecta luz azul e isso permite a visão em cores [6] [9].

O espectro magnético é normalmente dividido em bandas. O ser humano é sensível à radiação eletromagnética em uma banda estreita de comprimento de onda, denominada espectro visível ou luz visível. A banda visível pelo olho humano situa-se entre 380 nm e 760 nm, mas estes limites variam um pouco de pessoa pra pessoa. O espectro visível está representado na Figura 3.

Os cones podem ser classificados de acordo com a sua sensibilidade aos diferentes comprimentos de onda. Os que são sensíveis à cor vermelha são estimulados por comprimentos de onda longos, por volta dos 670 nm. Os sensíveis ao verde são estimulados por comprimentos de onda considerados médios, 540 nm. E os cones que são sensíveis ao azul são estimulados por comprimentos de onda curtos, na faixa de 440 nm. Quando esses três tipos de cones são estimulados a visão de diferentes tipos de cores se torna possível [11].

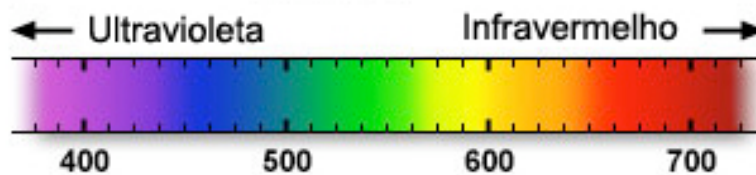


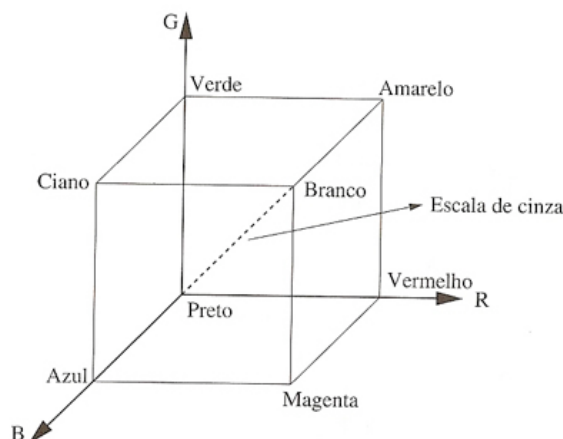
Figura 3. Espectro de luz visível.

Um comprimento de onda que excita 99% dos cones para vermelho, 40% dos cones para verde e nenhum dos cones para azul é visto como laranja. Um comprimento de onda que estimula cerca de 25% dos cones para vermelho, 70% dos cones para verde e 25% dos cones para azul é percebido como verde. Ou seja, a forma como o cérebro interpreta as cores depende da combinação dos cones excitados e dos graus de excitação de cada um [9].

### 2.2.1 Modelos de Cores

Modelos são utilizados para facilitar a especificação das cores em um formato padronizado. De forma geral, um modelo de cor é representado por um sistema de coordenadas tridimensionais.

O modelo de cores RGB (*Red, Green, Blue*) baseia-se em um sistema de coordenadas cartesianas e seu espaço de cores é um cubo. Como pode ser visto na Figura 4, as cores primárias vermelho, verde e azul se localizam em três vértices do cubo e as cores complementares ciano, magenta e amarelo em outros três vértices. O vértice de origem representa a cor preta, e o mais afastado representa a cor branca.



**Figura 4.** Sólido de cores, representando o modelo RGB [12].

Existem três características básicas que são normalmente usadas para distinguir e definir uma cor:

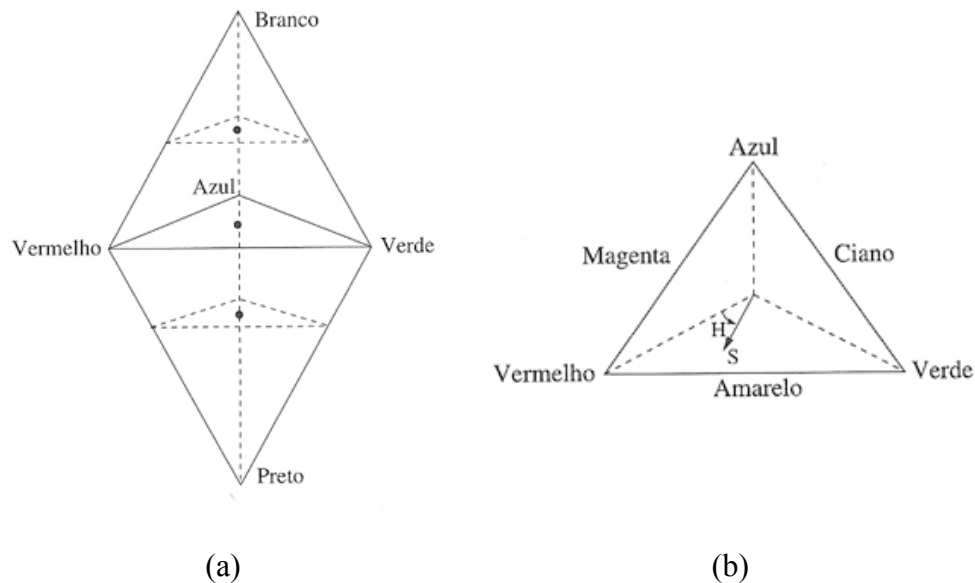
1. **Matiz:** representa a cor dominante percebida por um observador, ou seja, o comprimento de onda dominante absorvido pelos cones em uma mistura de ondas de luz. Define qual a cor percebida, pois quando diz-se que um objeto é vermelho esta é a especificação do seu matiz.
2. **Saturação:** refere-se à quantidade de luz branca misturada com um matiz ou pureza relativa. É possível distinguir vinte diferentes níveis de saturação para matizes de comprimentos de ondas curtos ou longos e seis níveis para comprimentos de onda médios. O cor-de-rosa, que é constituído da soma do vermelho com o branco, possui um grau de saturação menor que o vermelho, pois as cores do espectro puro são completamente saturadas.
3. **Brilho:** refere-se à noção cromática da intensidade ou quantidade de luz que um objeto emite.

O matiz e a saturação juntos podem ser chamados de cromaticidade, portanto uma cor pode ser caracterizada pelo seu brilho e sua cromaticidade.

O modelo de cor HSI (*Hue, Saturation, Intensity*) é bastante utilizado para o processamento de imagens, principalmente os que possuem algoritmos baseados em propriedades do sistema visual humano, uma vez que o seu componente de intensidade (I) é desacoplado da informação de cor na imagem e seus componentes de matiz (H) e saturação (S) são bastante relacionados com a percepção humana das cores.

Os três componentes do modelo HSI são representados em um espaço de cores tridimensionais. O resultado dessa combinação é uma estrutura piramidal de três lados que está representada na Figura 5.a.

Como pode ser observado na Figura 5.b, o matiz é determinado pelo ângulo do vetor em relação à cor vermelha, ou seja, quando o  $H = 0^\circ$  a cor é vermelha. A distância de uma cor em relação ao centro do triângulo determina a sua saturação. A intensidade do modelo HSI desempenha o papel do brilho e é medida por uma linha perpendicular localizada no centro do triângulo.



**Figura 5.** Modelo HSI: (a) Representação gráfica do modelo. (b) Variação dos parâmetros no modelo HSI [12].

A conversão dos componentes RGB para o modelo HSI se dá pelas expressões:

$$H = \arccos\left(\frac{(R - G) + (R - B)}{2\sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}}\right) \quad (2.1)$$

$$S = 1 - \frac{3 \min(R, G, B)}{R + G + B} \quad (2.2)$$

$$I = \frac{R + G + B}{3} \quad (2.3)$$

O modelo HSI permite pensar em cores mais claras e mais escuras. O aumento do brilho ou luminosidade (ao longo da linha acima do triângulo) permite pensar em cores mais claras. As intensidades localizadas abaixo do triângulo são mais escuras.

A cor é essencialmente um conceito subjetivo próprio do ser humano e consiste na interpretação que o sistema sensorial e o cérebro atribuem aos diferentes comprimentos de onda da luz recebida [6] [7] [11] [12].

## 2.3 Daltonismo

Estudos estatísticos demonstram que aproximadamente 8% da população masculina e 0,4% da população feminina possuem algum tipo de deficiência em relação à percepção das cores. As deficiências para as cores são também chamadas de discromatopsias, discromopsia ou simplesmente *daltonismo*. A palavra discromatopsia vem do grego, onde *dys* quer dizer distúrbio ou mal, *khroma*, *khromatos* significa cor e *opsis*, olho ou vista. Discromatopsia é um termo genérico usado para designar qualquer distúrbio de cores [3] [6] [13] [14] [15].

O daltonismo se manifesta como a incapacidade de distinguir cores que uma pessoa com sensibilidade cromática considerada normal conseguiria. Este fato, ao longo da história, despertou a curiosidade de muitos intelectuais e cientistas. O primeiro a estudar esse distúrbio com seriedade foi o famoso físico e químico inglês John Dalton em 1798, onde ele fez uma auto-análise de sua deficiência para as cores. O termo daltonismo foi dado em sua homenagem. O daltonismo pode ser de origem congênita ou adquirida, sendo normalmente hereditário e ligado ao cromossomo X. Devido a esse fator, incide cerca de 20 vezes mais no sexo masculino do que no sexo feminino [5] [6] [14] [16].

Em relação à visão em cores, a maioria dos indivíduos é tricromata, ou seja, possui o tricromatismo normal, enxerga a cor branca através de estímulos dos três cones.

Tratando-se dos indivíduos que possuem algum distúrbio de cores, como o daltonismo, é possível classificá-los em:

1. **Tricromatismo anômalo:** a luz branca é percebida através de proporções anômalas de vermelho, verde e azul, devido a uma mutação no pigmento dos fotorreceptores. Existem três tipos de tricromatismo anômalo classificados:
  - a. **Protanomalia:** menor sensibilidade ao vermelho devido a uma mutação do pigmento sensível às altas frequências. As cores que estão próximas das frequências mais altas podem se apresentar mais escuras.
  - b. **Deuteranomalia:** mutação do pigmento sensível às frequências médias, tornando difícil a diferenciação do verde.
  - c. **Tritanomalia:** impossibilita discriminar cores na faixa do azul-amarelo. As suas causas são pouco conhecidas devido à raridade que é encontrada. É a forma mais incomum de daltonismo.
2. **Dicromatismo:** devido à ausência de um tipo de cone, a luz branca é percebida através de apenas dois cones. Este tipo de distúrbio pode ser observado na Figura 6. O dicromatismo apresenta-se na forma de:
  - a. **Protanopia:** ausência de fotopigmentos sensíveis à luz vermelha (Figura 6.b).
  - b. **Deuteranopia:** ausência de fotopigmentos sensíveis à luz verde (Figura 6.c).
  - c. **Tritanopia:** ausência de fotopigmentos sensíveis à luz azul (Figura 6.d).
3. **Monocromatismo:** é a não percepção das cores. Este tipo de cegueira total das cores faz com que se enxergue o mundo em tons de cinza. É bastante raro e recebe o nome de visão acromática [6] [13] [14] [14] [16].



**Figura 6.** Efeitos dos diversos tipos de dicromatismo. Em (a) a imagem original, em (b) efeitos da protanopia, em (c) da deuteranopia e em (d) da tritanopia.



Apenas para simplificar a notação e evitar transcrever o nome completo das anomalias cromáticas do sistema visual, ao longo deste trabalho são adotados os termos *protan*, *deutan* e *tritan* para as deficiências de sensibilidade às frequências do vermelho, do verde e do azul, respectivamente.

A Tabela 1 apresenta os valores percentuais de incidência do daltonismo em homens e mulheres [6]. Pode-se observar que a deuteranomia é o distúrbio mais comum enquanto que a tritanomia e a tritanopia são formas bastante raras.

**Tabela 1.** Incidência do daltonismo dentro das suas variações em homens e mulheres.

Nome	Homens (%)	Mulheres (%)
<b>Tricromatismo Anômalo</b>		
Protanomalia	1,5	0,03
Deuteranomalia	5	0,40
Tritanomalia	Muito rara	Muito rara
<b>Dicromatismo</b>		
Protanopia	1	0,02
Deuteranopia	1	0,01
Tritanopia	Muito rara	Muito rara

É bastante comum que o portador de daltonismo viva muitos anos sem que perceba que possui uma deficiência na visão cromática, isto acontece principalmente quando o distúrbio se apresenta de forma leve. Há alguns anos isto não era algo que interferia muito, porém com a popularização do uso do computador, da Internet e de interfaces que possuem características cromáticas peculiares, a deficiência passou a ser uma dificuldade para os daltônicos.

### 2.3.1 Diagnóstico dos Tipos de Daltonismo

Até o presente, existem cerca de duzentos métodos de diagnóstico e classificação dos distúrbios de cor. No entanto, destes, cerca de vinte testes são mais comumente utilizados, relegando os restantes ao desuso ou a casos mais raros. Estes diversos testes podem ser classificados em subjetivos ou objetivos. Dentre os testes subjetivos, existem: as pranchas pseudoisocromáticas ou testes de discriminação, testes de arranjo ou ordenamento de matizes, de equalização, de nomeação ou denominação [6].

Na avaliação objetiva, há o método do potencial visual evocado que utiliza estímulos fotópicos variáveis e é utilizado no diagnóstico dos protânopes, deuterânopes e tritânopes [17].

É importante salientar a necessidade de uma padronização da iluminação durante a aplicação dos testes de sensibilidade cromática. Em 1931, a CIE, Comissão Internacional de Iluminação (*Comission Internationale de l'Éclairage*), padronizou os tipos básicos de fontes luminosas baseando-se na temperatura de cor ou cromaticidade das diferentes fontes luminosas [6]. Contudo, na realização desses testes por computador, a utilização de lâmpadas especiais para simulação de certas condições de iluminação não se faz necessária.

Na prática oftalmológica é fundamental a avaliação do senso cromático, tanto para os defeitos congênitos, como para os defeitos adquiridos. Por este motivo, diversos testes foram desenvolvidos, cada um com suas particularidades e dotados de diversos graus de sensibilidade.

Nos testes de discriminação, são utilizadas tábuas ou pranchas pseudoisocromáticas onde, normalmente, observa-se um objeto, que pode ser um número ou letra, delineado por uma

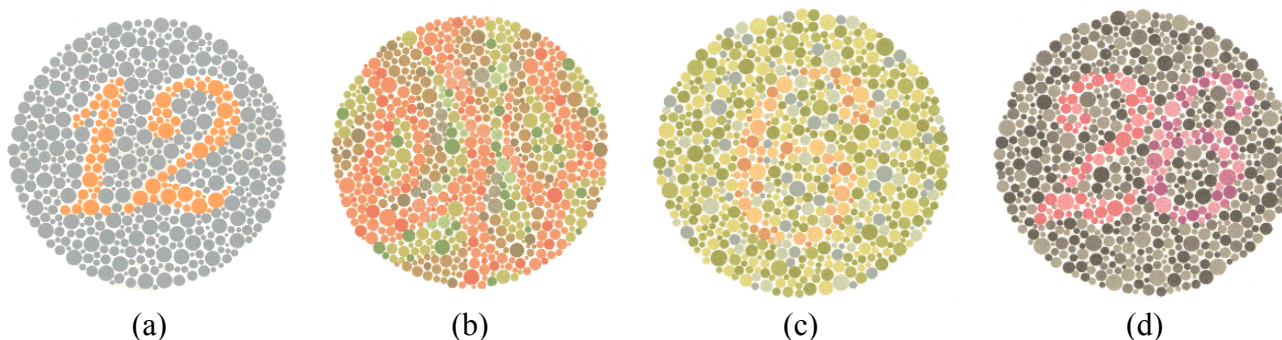
diferença de cor. As pranchas pseudoisocromáticas podem se apresentar de diversas formas, algumas delas são:

1. **Pranchas de Demonstração** – a figura é apresentada com um alto contraste em relação ao fundo, ou seja, portadores e não portadores de daltonismo são capazes de identificar a figura.
2. **Pranchas de Mascaramento** – a figura é apresentada com uma cor próxima ou no eixo de confusão do indivíduo portador de daltonismo.
3. **Pranchas Combinadas** – apresentam duas figuras e é a união da prancha de demonstração e da de mascaramento. Um indivíduo com visão considerada normal vê as duas imagens, um portador de daltonismo vê apenas a imagem demonstrativa.
4. **Pranchas Diagnósticas** – possui duas imagens mascaradas. Uma das imagens é descoberta por protanômalos e a outra por deuteranômalos.
5. **Pranchas Quantitativas** – nestas as cores se diferenciam gradativamente com a finalidade de se medir a severidade do distúrbio.
6. **Pranchas Escondidas** – a figura é apenas identificada pelas pessoas que possuem algum tipo de deficiência na visão cromática.

Os tipos de pranchas apresentados acima são combinados em diversos testes, dentre os quais os testes mais utilizados são os que seguem:

1. **Teste de Ishihara** – é bastante popular, sendo o mais conhecido e utilizado no mundo. Foi criado em 1906 pelo professor Dr. Shinobu Ishihara da Universidade de Tóquio, com o intuito de diagnosticar deficiências congênicas para a visão em cores, entretanto, também pode ser usado para detecção de defeitos adquiridos. Possui vários tipos de pranchas, como: de demonstração, escondidas, mascaradas e diagnósticas, como ilustradas na Figura 7. As pranchas diagnósticas (Figura 7.d) têm o objetivo de diferenciar protanomalias e deuteranomalias. Este teste passou por várias avaliações de eficácia e por diversos aperfeiçoamentos. Suas edições mais utilizadas possuem números e linhas para serem identificadas e apresenta-se nas versões de 24 e 38 pranchas. Apesar deste teste não fornecer uma avaliação quantitativa do problema e de não identificar deficiências do tipo tritan, estudos mostram que o teste de Ishihara continua sendo o exame mais eficaz para uma rápida identificação das deficiências congênicas para visão de cores.
2. **Pranchas Pseudoisocromáticas da American Optical Hardy-Rand-Rittler** – este teste tem como objetivo principal detectar as deficiências congênicas do tipo protan, deutan e tritan, além de estimar a severidade do problema. Esse teste surgiu em 1955 e já passou por mais três edições. Uma das críticas em relação a esse teste é sua falha em diagnosticar deficiências vermelho-verde com precisão, fornecendo resultados falso-positivos, ou seja, pessoas com sensibilidade cromática normal podem ser consideradas portadoras de deficiência.
3. **Pranchas Pseudoisocromáticas Standard** – apresenta-se em dois volumes. O primeiro volume possui testes para detecção de alterações congênicas da sensibilidade cromática. É adequado para diagnosticar deficiências do tipo vermelho-verde e não fornece uma avaliação quantitativa. O segundo volume destina-se a detecção de defeitos adquiridos. Além dos testes para deficiências do tipo vermelho-verde, possui testes para o diagnóstico de deficiências do tipo azul-amarelo. Este teste é bastante utilizado e possui grande aceitação nos estudos dos defeitos adquiridos da sensibilidade cromática.





**Figura 7.** Pranchas de Ishihara: (a) Prancha de demonstração, (b) Prancha escondida, (c) Prancha mascarada e (d) Prancha de diagnóstico.

Um teste de arranjo muito conhecido é o Teste de Farnsworth-Munsell D15 ou Panel D-15 que consiste em uma caixa com uma peça de referência fixa localizada no início da seqüência a ser reproduzida e 15 peças móveis. Seu objetivo é diferenciar defeitos severos da visão cromática dos defeitos médios e dos indivíduos normais.

Outro exemplo de teste de arranjo seria o Teste de Farnsworth-Munsell 100 Hue (FM 100 Hue). O teste FM 100 Hue possui oitenta e cinco peças divididas em quatro caixas. Cada caixa possui duas peças fixas de referência e o teste consiste basicamente na ordenação por cor das peças móveis. Este teste apesar de poder ser aplicado para deficiências congênitas e adquiridas, apresenta limitações para classificar defeitos protan e deutan congênitos.

Dentre os testes de equalização podem se destacar os Anomaloscópios, que permitem a classificação das deficiências congênitas, diferenciando indivíduos com tricromatismo anômalo de normais e dicromatas de tricromatas anômalos.

Entre os testes de nomeação, estão as lanternas de Erdrige-Green, Hering, Berens Stein, Giles Archer e Aczel. Os testes de nomeação de cores são também conhecidos como lanternas coloridas e não são considerados seguros para a avaliação detalhada das alterações da visão cromática, contudo, apresentam um bom desempenho nas avaliações ocupacionais, como na avaliação de operários ferroviários, por exemplo, pois simulam uma situação prática.

Apesar do avanço no desenvolvimento dos testes diagnósticos e de classificação, ainda não existe um teste ideal, que aplicado em todos os casos forneça um resultado exato. Em decorrência disto, muitas vezes dois ou mais testes são utilizados para que o resultado se apresente mais confiável.

Devido ao fato dos distúrbios cromáticos congênitos serem desordens comuns e não progressivas, a maioria dos seus portadores passa boa parte da vida sem sequer conhecer essas perturbações e suas conseqüências limitadoras. Um diagnóstico precoce aumentaria a qualidade de vida dos portadores de distúrbios como o daltonismo [6] [17].

### 2.3.2 Daltonismo e Acessibilidade

A sociedade atual vive em um mundo inundado de cor. A cor está presente em tudo que pode ser observado, tornando-se um elemento essencial para o ser humano, que tanto associa a informação de cor a entidades de natureza cultural, psicológica ou simplesmente funcional, quanto é afetado por ela de forma consciente ou inconsciente, como atestam os diversos testes psicológicos que envolvem cores, as formas alternativas de terapia que utilizam objetos coloridos e luzes diversas,

o uso das cores para representação de valores simbólicos, tais como a presença e simbologia das cores nas diversas religiões e culturas, dentre outros fatores.

A cor tem a capacidade de transmitir informações, como acontece nos mapas para representação de relevo, onde diferentes níveis de elevação são representados por diferentes cores. Outro exemplo seriam os mapas de temperatura onde as cores avermelhadas representam as zonas mais quentes e as cores em tom de azul representam as zonas mais frias. É, também, através da percepção das cores que é possível extrair informações da natureza como o frescor de frutas e vegetais e a identificação de muitas doenças [18].

Contudo, portadores de distúrbios cromáticos estão cada vez mais em desvantagem nas atividades que necessitam de comparações mais refinadas de cores com associação de padrões e discriminação de tonalidades intermediárias. Para os distúrbios congênitos, como o daltonismo, é na infância que as primeiras dificuldades aparecem, com desenho de mapas e identificação dos lápis de cores. No dia-a-dia, algumas dificuldades podem aparecer como, por exemplo, ler mapas relativamente simples ou precisar de companhia para comprar roupas. Em sua maioria, os distúrbios referem-se às cores verdes e vermelhas, o que pode ocasionar dificuldades na identificação de LED's (*Light Emitting Diodes*) com duas ou três cores, muito encontrados nos carregadores de celular e em monitores de computador.

O daltonismo não é considerado uma doença debilitante, apesar de dificultar algumas atividades diárias e impossibilitar algumas escolhas profissionais, como por exemplo, ser piloto de avião, engenheiro elétrico (por causa da representação de cores utilizada na identificação de componentes elétricos e eletrônicos), trabalhar na indústria gráfica em geral, indústria química, com decoração, geologia, moda etc. [19].

Uma porção importante da informação visual desaparece quando vista por portadores de daltonismo. Desta forma, é possível afirmar que o daltonismo apresenta-se como um obstáculo ao uso efetivo do computador que, atualmente, utiliza cada vez mais recursos gráficos nas suas interfaces e na sua comunicação visual. Um estudo recente sobre usabilidade apontou a acessibilidade cromática como o segundo maior problema de acessibilidade em relação ao uso da *web* (*World Wide Web*). Em uma avaliação de 1000 *sites* da *web*, utilizando os padrões da W3C, *World Wide Web Consortium*, 81% falharam em satisfazer condições básicas de uso de cores e em utilizar uma baixo contraste entre o conteúdo e o contexto [16] [20].

É crescente o empenho em gerar ferramentas computacionais voltadas para a acessibilidade dos portadores de distúrbios visuais, principalmente os relacionados a cores. Os simuladores de daltonismo já são bastante comuns e auxiliam o *designer* ou desenvolvedor na escolha de cores, evitando que as informações apresentem-se confusas ou mesmo ilegíveis. Um exemplo dessa iniciativa foi o desenvolvimento do ASES – Avaliador e Simulador de Acessibilidade de Sítios – pelo Departamento de Governo Eletrônico do Brasil em conjunto com a OSCIP (Organização da Sociedade Civil de Interesse Público) chamada Acessibilidade Brasil. O ASES é uma ferramenta que, entre outras coisas, possui um leitor de tela que simula problemas de baixa visão como daltonismo, miopia, catarata, glaucoma etc. Para os brasileiros o programa é distribuído de forma gratuita sob licença LGPL, *GNU Lesser General Public License* [21] [22].

Outro exemplo de ferramenta é o Color Oracle, um aplicativo onde um filtro de cor é aplicado em toda a tela e permite que pessoas com visão cromática considerada normal enxerguem como pessoas portadoras de daltonismo. Esta ferramenta simula os três tipos de dicromatismo: protanopia, deuteranopia e tritanopia. Parte do princípio que se algo for desenvolvido para pessoas com extremo daltonismo, que é o caso do dicromatismo, o resultado desse trabalho também será legível para tricomas anômalos ou mesmo para pessoas normais. O

Color Oracle atua na etapa de desenvolvimento sendo bastante útil na prevenção de problemas de acessibilidade, contudo não apresenta nenhuma solução para problemas já existentes [4].

Existem muitos outros simuladores de daltonismo como, por exemplo, o Sim Daltonism, que simula dicromatismos e tricromatismos anômalos embora só funcione no Mac OS X. O ColorDoctor é outro aplicativo de simulação de dicromatismos. Apesar de também simular o monocromatismo e permitir que o usuário salve o resultado da simulação como uma imagem, restringe-se ao sistema operacional Windows XP ou Vista, além de exigir a última versão do *framework* .NET instalada como pré-requisito para seu funcionamento [23] [24].

Outra forma interessante de simular o daltonismo é utilizando *plugins*. O Vischeck [25] é um *plugin* que simula os três tipos de dicromatismos. Apesar de ser gratuito, é mais acessível aos usuários da ferramenta de edição de imagem Photoshop e do sistema operacional Windows. Simuladores on-line também são encontrados e aplicam filtros em endereços *web* ou em imagens fornecidas pelo usuário.

A simulação é importante para evitar problemas graves de acessibilidade em *sites* e em *softwares*, como também, para auxiliar o entendimento das limitações perceptivas de um portador de daltonismo.

Além das aplicações de simulação, que possuem um importante caráter preventivo, existem aplicativos que procuram melhorar a qualidade visual de imagens para pessoas que possuem algum tipo de distúrbio na percepção das cores. São exemplos de aplicativos como esse propósito: o New Pigment [26], que consiste de um navegador que altera as cores das imagens para que tricromatas anômalos possam vê-las com mais facilidade. Este *software* é proprietário, mas se pode experimentar uma versão de avaliação (*trial*). O EyePilot [27] é outra aplicação encontrada no mercado, disponível, também, em versão de avaliação, que procura melhorar a qualidade de vida de usuários portadores de distúrbios cromáticos. O usuário, ao utilizar o EyePilot, enxerga sua área de trabalho através de uma janela da aplicação. Esta possui diversas ferramentas como: isolamento, nomeação e substituição de cores, sendo bastante útil na visualização de mapas e gráficos. Também é possível fazer mudanças no matiz, alterando o esquema de cores da imagem.

Contudo, na maioria das aplicações que procuram diminuir os efeitos do daltonismo, pressupõe-se que o usuário já conheça o seu tipo de distúrbio e não considera que esse distúrbio pode ocorrer em graus variados, diferenciando-se de pessoa pra pessoa. Muitas vezes as imagens sofrem alterações de cor e contraste demasiadas e de forma desnecessária, pois não há uma adaptação à deficiência do usuário que faz uso da aplicação. O diferencial de se utilizar um filtro adaptativo está no diagnóstico do problema e na utilização de uma abordagem que considere a incerteza associada ao problema, onde a Lógica Fuzzy se coloca como candidata natural para a resolução na adaptação ao usuário de acordo com seu grau de daltonismo.

Este trabalho se propõe a gerar uma alternativa de acessibilidade para daltônicos, a partir do desenvolvimento de uma ferramenta adaptativa, que deve englobar desde os testes para o diagnóstico do tipo de distúrbio para as cores, considerando em que grau ele se apresenta até a visualização da imagem com as correções que procuram diminuir os efeitos do distúrbio cromático. Esta customização visa melhorar ainda mais a qualidade visual dos portadores de daltonismo. A solução desenvolvida foi validada pelo uso de métodos de simulação de daltonismo e pela avaliação de voluntários que integram os grupos de teste e de controle deste estudo.

# Capítulo 3

## Lógica Fuzzy

### 3.1 Introdução

O filósofo grego, Aristóteles (384 a.C. – 322 a.C.), foi o fundador de um dos pilares do conhecimento científico ocidental: a Lógica Formal a qual está baseada em premissas e conclusões. Na Lógica tradicional ou de Boole, uma declaração só pode ser considerada completamente verdadeira, possuindo grau de verdade igual a um, ou completamente falsa, possuindo grau de verdade igual a zero. A Lógica de Boole só admite dois valores de verdade, não existe um meio termo. Esta mesma lógica é utilizada, atualmente, nos computadores que utilizam uma base binária para representar e armazenar informações. Porém, existem situações onde apenas dois valores (sim e não, verdadeiro e falso, ligado e desligado, etc.) não são suficientemente representativos [28] [29].

Em 1965, o professor Lotfi A. Zadeh publicou o artigo *Fuzzy Sets* pela Universidade da Califórnia, em Berkeley, apresentando os conceitos da Lógica Fuzzy. A Lógica Fuzzy, também conhecida como Lógica Nebulosa ou Difusa, foi desenvolvida para representar incertezas, conhecimentos imprecisos e situações ambíguas onde não era possível a utilização da Lógica Booleana. Na Lógica Fuzzy, uma premissa varia seu grau de verdade de zero a um, podendo ser considerada parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa. Os conjuntos Fuzzy têm como objetivo aproximar a interpretação de uma máquina do raciocínio humano [30] [31].

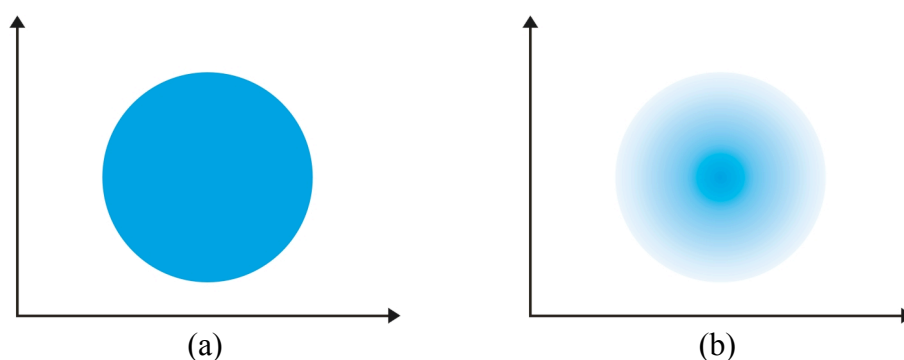
A Lógica Fuzzy possui inúmeras vantagens, como: o uso de variáveis lingüísticas, o que aproxima do pensamento humano; necessidade de poucas regras e valores; robustez, pois não requer entradas precisas, etc. Isso justifica o seu crescente uso em aplicações que fazem uso de Inteligência Artificial.

O Japão é considerado pioneiro nos estudos sobre Lógica Fuzzy, começando seus estudos a partir da segunda metade da década de 1980 e produzindo mais de 30% dos artigos publicados a esse respeito. Hoje, os japoneses utilizam extensivamente Lógica Fuzzy em seus produtos comerciais que vão desde transmissão automotiva, injeção eletrônica, elevadores até máquinas de lavar roupa que recorrem a controladores Fuzzy para controle de peso, verificação de tecido, detecção de sujeira que adaptam os ciclos de lavagem para o uso otimizado de potência, água e detergente [32].

Sistemas baseados em Lógica Fuzzy têm demonstrado grande utilidade em operações de controle industrial, sistemas especialistas que necessitam de maior flexibilidade, reconhecimento de caracteres [29], avaliação de crédito financeiro [30], controle automático de foco em câmeras fotográficas [30], controladores de tráfego [30] e em processamento de imagens [29].

## 3.2 Teoria dos Conjuntos Fuzzy

A Teoria dos Conjuntos Fuzzy [33] deriva da Teoria dos Conjuntos tradicional e permite superar as limitações impostas pela lógica tradicional além de modelar classes dotadas de imprecisão que, se fossem modeladas como conjuntos, não apresentariam fronteiras bem definidas, como pode ser observado na Figura 8.a e Figura 8.b . Semelhantemente à Álgebra Booleana, que está contida na Teoria dos Conjuntos tradicional, a Lógica Fuzzy foi incorporada pela Teoria dos Conjuntos Fuzzy.



**Figura 8.** Representações dos conjuntos: tradicional (a) com fronteiras bem definidas e Fuzzy (b) com fronteiras nebulosas.

Os conjuntos podem ser classificados quantitativamente, como por exemplo: perto, morno, quase e grande. E os elementos pertencentes a estes conjuntos são classificados segundo o seu grau de pertinência. O conceito de grau de pertinência expressa a idéia de incerteza não estatística, a Lógica Fuzzy procura tratar conceitos vagos, e não incerteza no sentido probabilístico.

## 3.3 Funções de Pertinência

As funções de pertinência surgiram da necessidade de se modelar conjuntos que possuem uma fronteira nebulosa.

Como foi visto, a Teoria dos Conjuntos Fuzzy é uma extensão da Teoria dos Conjuntos tradicional. Nesta última, para qualquer conjunto pode ser definida uma função chamada característica, que declara quais elementos do conjunto universo  $\Omega$  pertencem ao conjunto A. A função de pertinência  $\mu_A : \Omega \rightarrow [0,1]$  é definida da seguinte forma:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases}$$

Imagine um problema onde se faz necessário selecionar alunos que possuam notas *mais ou menos* 7. O termo *mais ou menos* deixa claro que este se trata de um problema nebuloso. Pode-se definir com  $G_1$  o conjunto de notas aceitáveis:

$$G_1 = \{x \in X : g(x) = 7\},$$

onde  $X$  representa a amostra de alunos que são avaliados,  $x$  é um elemento da amostra e  $g(x)$  é a nota do aluno.

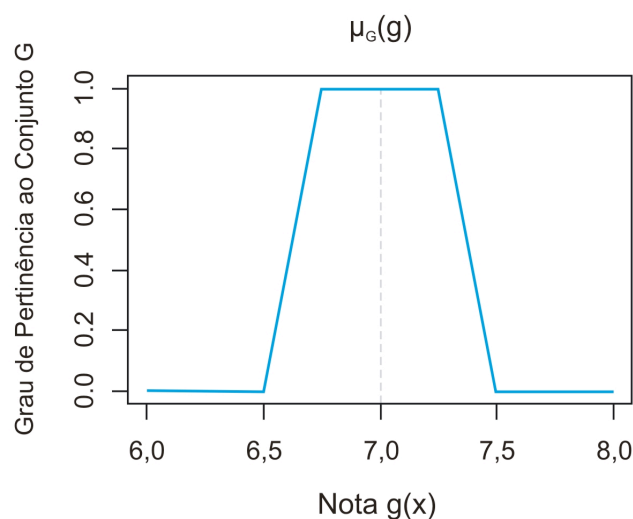
Devido ao caráter impreciso do problema, é fácil perceber que valores como 7,05 deveriam estar contidos no conjunto de notas aceitáveis e não estão. Dessa forma, o conjunto  $G_1$  não é a solução real do problema. Pode-se considerar uma tolerância de  $\pm 0,5$  nas notas dos alunos, definindo-se uma nova possível solução:

$$G_2 = \{x \in X : 6,5 \leq g(x) \leq 7,5\}.$$

Mesmo com esta nova possível solução, não é certo que alunos com notas  $g(x)=7,51$  sejam descartados. Para este tipo de situação as funções de pertinência são necessárias. Uma função de pertinência  $\mu_G$  para notas aceitáveis pode ser definida como:

$$\mu_G(g(x)) = \begin{cases} (g(x) - 6,0) / 0,5, & 6,0 \leq g(x) \leq 6,5 \\ 1, & 6,5 \leq g(x) \leq 7,5 \\ (8,0 - g(x)) / 0,5, & 7,5 \leq g(x) \leq 8,0 \\ 0 & c.c. \end{cases}$$

onde  $\mu_G(g(x))$  expressa o grau de pertinência de  $g(x)$  e é um número entre zero e um. O grau de pertinência está representado na Figura 9 por uma função trapezoidal, embora elas possam assumir outros formatos, como: triangulares, gaussianas, sigmoidais, retangulares etc.



**Figura 9.** Função de pertinência  $\mu_G$  da nota do indivíduo  $x$  ao conjunto solução das notas aceitáveis  $G$ .



Note que quanto mais afastado estiver o valor da nota de um aluno, menor será o seu grau de pertinência ou grau de pertencimento ao grupo de notas *mais ou menos 7*.

## 3.4 Álgebra de Conjuntos

Apresentamos aqui os principais conceitos da álgebra de conjuntos em sua forma clássica como definida por Cantor e a versão fuzzy desses conceitos.

### 3.4.1 Definições Clássicas

Considere  $\Omega$  o conjunto universo onde  $A, B$  estão contidos ( $A, B \subseteq \Omega$ ). A álgebra do conjunto potência  $P(X) \subseteq \Omega$ , onde  $X$  é um conjunto qualquer e  $x$  um elemento de  $X$ , é definida segundo as operações e relações, onde  $A, B \in P(X)$ :

**Subconjuntos:**  $A \subseteq B \Leftrightarrow x \in A \Rightarrow x \in B$

**Igualdade:**  $A = B \Leftrightarrow (A \subseteq B) \wedge (B \subseteq A)$

**Complemento:**  $\bar{A} = \Omega - A$

**Intersecção:**  $A \cap B = \{x \in X : (x \in A) \wedge (x \in B)\}$

**União:**  $A \cup B = \{x \in X : (x \in A) \vee (x \in B)\}$

Os símbolos  $\vee$  e  $\wedge$  representam, respectivamente, OU e E. Esta notação é usada ao longo deste trabalho.

$P(X)$  é um conjunto de conjuntos em  $\Omega$ , então, se  $A \subseteq X$  é possível afirmar que  $A \in P(X)$ . Os operadores primitivos são indicados pela quintupla ( $\subseteq, =, \bar{\cdot}, \cup, \cap$ ) e o conjunto vazio é representado pelo símbolo  $\emptyset$ .

O par  $(X, P(X))$  é chamado de  $\sigma$ -álgebra quando obedece às seguintes propriedades:

$$\emptyset \subseteq P(X), \quad (3.1)$$

$$A \in P(X) \Rightarrow \bar{A} \in P(X), \quad (3.2)$$

$$A, B \in P(X) \Rightarrow A \cup B \in P(X). \quad (3.3)$$

Para todo  $A, B \in P(X)$ , as leis De Morgan são derivadas das propriedades (3.1), (3.2) e (3.3):

$$\overline{A \cup B} = \bar{A} \cap \bar{B}, \quad (3.4)$$

$$\overline{A \cap B} = \bar{A} \cup \bar{B}. \quad (3.5)$$

Através da indução matemática, as leis De Morgan podem ser generalizadas para um número  $n$  de termos  $A_i$  tal que  $n < \infty$  :

$$\overline{\bigcup_{i=1}^n A_i} = \bigcap_{i=1}^n \overline{A_i}, \quad (3.6)$$

$$\overline{\bigcap_{i=1}^n A_i} = \bigcup_{i=1}^n \overline{A_i}. \quad (3.7)$$

### 3.4.2 Definições Fuzzy

Assim como nos conjuntos clássicos, pode-se verificar para os conjuntos nebulosos a existência de operações de conjuntos correspondentes. Como a função de pertinência é considerada um componente fundamental para um conjunto nebuloso, as operações sobre os conjuntos fuzzy são definidas via funções de pertinência.

Seguindo a  $\sigma$ -álgebra  $(X, P(X))$  definida na Seção 3.4, cada conjunto  $X$  é associado a uma função de pertinência  $\mu_X : \Omega \rightarrow [0,1]$ . Logo, um conjunto  $A \subseteq X$  está associado a uma função de pertinência  $\mu_A : X \rightarrow [0,1]$ . Formalmente, tem-se:

$$\begin{aligned} X &\Leftrightarrow \mu_X : \Omega \rightarrow [0,1] \\ A \subseteq X &\Rightarrow A \Leftrightarrow \mu_A : X \rightarrow [0,1] \end{aligned}$$

Observe que as operações obedecem ao princípio da extensão, onde os conceitos, rigor e formalismo da matemática clássica estendem-se à Álgebra dos Conjuntos Fuzzy. Seguem as definições representadas por relações e operações lógicas:

**Subconjuntos:**  $\mu_A \leq \mu_B \Leftrightarrow \mu_A(x) \leq \mu_B(x)$

**Igualdade:**  $\mu_A = \mu_B \Leftrightarrow \mu_A(x) = \mu_B(x)$

**Complemento:**  $\overline{\mu_A}(x) = \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$

**Intersecção:**  $\mu_{A \cap B}(x) = (\mu_A \wedge \mu_B)(x) := \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$

**União:**  $\mu_{A \cup B}(x) = (\mu_A \vee \mu_B)(x) := \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$

É importante salientar dois conjuntos importantes definidos na Álgebra Fuzzy: **1** e **0**. Dada a  $\sigma$ -álgebra  $(X, P(X))$ , tem-se que:

$$\mathbf{1}(x) := 1, \quad \forall x \in X,$$

$$\mathbf{0}(x) := 0, \quad \forall x \in X,$$



onde  $\mathbf{1} \Leftrightarrow X$  e  $\mathbf{0} \Leftrightarrow \emptyset$ , ou seja,  $\mathbf{1}$  relaciona-se com o conjunto domínio da  $\sigma$ -álgebra e  $\mathbf{0}$  com o conjunto vazio [33] [34] [35].

## 3.5 Controlador Fuzzy

Um controle Fuzzy utiliza regras lógicas no algoritmo de controle para descrever em uma rotina a experiência humana, intuição e heurística para controlar um processo. Já nos controladores tradicionais, o algoritmo de controle é descrito por equações algébricas ou diferenciais, através de um modelo matemático.

Controladores Fuzzy possuem alta adaptabilidade, agregam conhecimento e demonstram-se bastante versáteis em sistemas que apresentam um modelo físico de difícil representação matemática.

Foi graças às pesquisas e projetos do professor E. H. Mamdani que diversos conceitos sobre os conjuntos Fuzzy, transformaram-se em um mecanismo de aplicação prática. A partir do modelo *Fuzzy Logic Controller*, criado por Mamdani, originaram-se as técnicas de controle Fuzzy [36].

A estrutura de universo de discurso, variáveis lingüísticas, *fuzzificação*, base de conhecimento, máquina de inferência e sistema de *defuzzificação* propostos por Mamdani, representam uma forma de simplificar e aumentar a velocidade do processamento do controlador, o que possibilita decisões rápidas em um ambiente onde os conceitos encontram-se vagos. A Figura 10 ilustra em blocos o controlador Fuzzy proposto por Mamdani [36].



Figura 10. Ilustração em blocos do controlador Fuzzy proposto por Mamdani.

### 3.5.1 Variável Lingüística

Uma variável lingüística pode ser definida por uma quádrupla  $(X, \Omega, T(X), M)$ , onde  $X$  é o nome da variável,  $\Omega$  é o universo de discurso de  $X$ ,  $T(X)$  é um conjunto de nomes para os valores de  $X$  e  $M$  é uma relação entre uma função de pertinência e cada elemento de  $T(X)$ . Aqui, termos lingüísticos são, indistintamente, tanto os elementos de  $T(X)$  quando suas funções de pertinência.

O grau com que um valor  $x$  em  $\Omega$  satisfaz o termo lingüístico  $A$  é a pertinência de  $x$  em  $A$ , dada por  $\mu_A(x)$ .

### 3.5.2 Fuzzificação

É no processo de *fuzzificação* que entradas discretas – variáveis lingüísticas atreladas a algum tipo de escala numérica, como, por exemplo: temperatura de 45°C – são transformadas em entradas nebulosas ou *fuzzy inputs*, como, por exemplo: quente [37] [38].

### 3.5.3 Base de Conhecimento

A base de conhecimento consiste de uma base de dados e de uma base de regras que caracterizam a estratégia de controle. É na base de dados que estão as definições sobre a discretização e normalização dos universos de discurso, e as definições das funções de pertinência dos termos Fuzzy [37] [38].

A base de regras é formada por estruturas como:

**Se** <conjunto de condições ou premissa> **Então** <ações ou conclusão>.

As regras e os dados de entrada são processados pela máquina de inferência, que infere as ações de controle de acordo com o estado do sistema.

### 3.5.4 Máquina de Inferência

A máquina de inferência, também chamada de procedimento de inferência consiste da:

1. Verificação do grau de compatibilidade entre os fatos e as cláusulas nas premissas das regras;
2. Determinação do grau de compatibilidade global da premissa de cada regra;
3. Determinação do valor da conclusão, em função do grau de compatibilidade da regra com os dados e a ação de controle constante na conclusão (premissa ou não);
4. Agregação dos valores obtidos como conclusão nas várias regras, obtendo-se uma ação de controle global.

Existem diversos tipos de controladores *fuzzy*, entretanto, os principais são: modelos clássicos (modelo de Mamdani e o de Larsen) e os modelos de interpolação (modelo de Takagi-Sugeno e o de Tsukamoto). Eles diferem entre si quanto à forma de representar os termos na premissa, as ações de controle e operadores utilizados para a implementação do controlador [37] [38].

### 3.5.5 Defuzzificação

No processo de *defuzzificação*, a variável Fuzzy produzida pela máquina de inferência é transformada em uma variável numérica, determinística, que atua no processo de forma a regulá-lo. Diversos métodos podem ser utilizados, por exemplo: Método do critério máximo, Método do centro da gravidade, Método da média dos máximos e Método do Singleton [37] [39].

Controladores Fuzzy têm se mostrado importantes no controle de processos onde controladores convencionais falham ou não possuem um bom desempenho devido, principalmente, a um conhecimento impreciso do comportamento dinâmico e dos parâmetros do processo.

Neste Capítulo foram vistos alguns conceitos básicos sobre Lógica Fuzzy visando a um melhor entendimento do desenvolvimento da ferramenta proposta neste trabalho.

## Capítulo 4

# Experimentos e Resultados

Este Capítulo apresenta as ferramentas de teste, simulação e correção, desenvolvidas com o objetivo de aumentar a acessibilidade e promover uma maior inclusão dos portadores de daltonismo. Também são apresentados alguns experimentos e resultados da proposta de correção de imagens.

### 4.1 Ferramenta de Teste de Daltonismo

Como descrito no Capítulo 2, é bastante comum que portadores de daltonismo não percebam que possuem um distúrbio visual cromático, e muitos, quando descobrem o problema, não sabem classificá-lo. Contudo, é muito importante, para melhorar eficientemente a qualidade de vida dos portadores de daltonismo, o conhecimento de informações como: o tipo do daltonismo e em que grau ele se encontra.

Para preencher esta lacuna de informações, foi desenvolvida uma ferramenta de teste de daltonismo chamada de DaltonTest. O objetivo desta ferramenta é classificar o daltonismo, apresentando o grau da deficiência e das suas possíveis formas de apresentação.

Na ferramenta DaltonTest, o usuário é submetido ao teste de Ishihara. Como visto anteriormente, com o teste de Ishihara é possível diferenciar os tipos mais comuns de daltonismo: as protanomalias e as deuteranomalias. Originalmente, o teste de Ishihara não fornece uma avaliação quantitativa do problema e para sanar esta deficiência, o teste foi customizado por meio da utilização de pesos. Diferentes pesos foram atribuídos às perguntas, de forma que as respostas imprecisas recebam menos pontos que as respostas precisas. Esta simples mudança permite avaliar, aproximadamente, o grau de daltonismo do usuário. A estrutura de atribuição de pesos está representada na Tabela 2.

**Tabela 2.** Representação tabular da distribuição de pesos da ferramenta DaltonTest, onde RE = Resposta Esperada, P = Peso, PP = Peso para Protanomia, PD = Peso para Deuteranomalia, Protan = Protanomia, Deutan = Deuteranomalia, Mono = Monocromatismo, ‘\*’ = Resposta em branco e ‘-’ = Campos que não se aplicam.

Prancha	Normal		Daltonismo														Mono	
	RE	P	RE	P	RE	P	RE	P	RE	P	RE	P	RE	P	RE	P	RE	P
01	12	0	12	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12	0
02	8	2	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	*	2
03	29	2	70	2	7	1	0	1	79	1	20	1	2	1	9	1	*	2
04	5	2	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	*	2
05	3	2	5	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	*	2
06	15	2	17	2	1	1	7	1	5	1	-	-	-	-	-	-	*	2
07	74	2	21	2	7	1	4	1	71	1	24	1	2	1	1	1	*	2
08	6	2	*	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
09	45	2	*	2	4	1	5	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	5	2	*	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	7	2	*	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	16	2	*	2	1	1	6	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	73	2	*	2	7	1	3	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	*	4	5	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	*	4	45	4	4	2	5	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			Protan						Deutan									
			RE	P	PP	RE	P	PP	RE	P	PD	RE	P	PD				
16	26	2	6	2	2	(2)6	2	1	2	2	2	2(6)	2	1	-	-		
17	42	2	2	2	2	(4)2	2	1	4	2	2	4(2)	2	1	-	-		
18	x1x2	2	x2	2	2	(x1)x2	2	1	x1	2	x1(x2)	x1(x2)	2	1	-	-		
19	*	2	x	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
20	x	2	*	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
21	x	2	*	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
22	x	2	*	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
23	x	2	*	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
24	x	0	x	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	0	

Observe que cada prancha admite diferentes possíveis respostas e, dessa forma, existe um conjunto de respostas esperadas (RE). Cada uma das respostas pertence a um grupo, como Normal, Daltonismo, Protan, Deutan ou Mono. Na prancha 16, por exemplo, espera-se que uma pessoa com visão cromática normal responda 26 e que um portador de protanomia responda 6, neste último caso, recebe peso dois para Protan e peso dois para Daltonismo. No caso do usuário enxergar bem o número 6 e notar que o algarismo 2 é visto com muita dificuldade, receberá peso um para Protan, pois demonstra que sua protanomia não é tão acentuada. A prancha 18, ao invés de possuir algarismos, possui caminhos ou trilhas identificadas pelos códigos x1 e x2. A resposta ‘x1x2’ significa que as duas trilhas foram percebidas. As pranchas 1 e 24 são demonstrativas, para que portadores de daltonismo compreendam o teste e possuem peso zero para qualquer um dos casos. Todas as imagens das pranchas pseudoisocromáticas utilizadas no DaltonTest encontram-se no Anexo A.

#### 4.1.1 Desenvolvimento

A linguagem de programação utilizada para o desenvolvimento da ferramenta DaltonSim foi Python [40]. Esta escolha foi fundamentada em algumas características da linguagem, como: ser de alto nível, possuir uma sintaxe moderna, orientada a objetos, modular, multiplataforma e de

fácil aprendizado [41]. Python possui uma licença livre compatível com a GPL, *General Public Licence* [42].

A Ferramenta utiliza em seu visual a biblioteca PyQt [43], que faz a ponte entre o Python e a Qt [44], uma biblioteca multiplataforma para o desenvolvimento de interfaces gráficas [45].

Um arquivo XML (*eXtensible Markup Language*) [46] descreve a estrutura dos testes na aplicação. Esta solução foi adotada baseada nas necessidades do programa que, devido a sua dimensão, não fez necessário o uso de um banco de dados para armazenamento. O XML, além de atender os requisitos de organização hierárquica, é simples e de fácil legibilidade. A Figura 11 mostra um exemplo da estrutura de dados adotada para descrever e armazenar uma questão do teste de Ishihara utilizado na ferramenta DaltonTest.

```

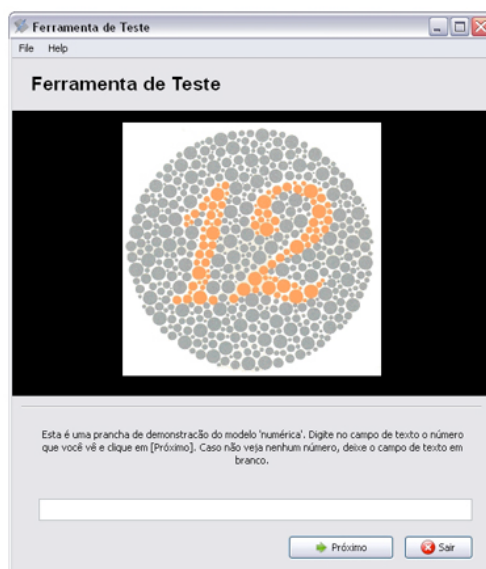
1  <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
2  <images>
3      <image image="ishihara16.gif" question="Digite no campo de texto...">
4          <normal weigth="2" answer="26"/>
5          <colorblind weigth="2">
6              <protan weigth="2" answer="6"/>
7              <protan weigth="1" answer="(2)6"/>
8              <deutan weigth="2" answer="2"/>
9              <deutan weigth="1" answer="2(6)"/>
10         </colorblind>
11     </image>
12 </images>

```

**Figura 11.** Exemplo do código XML descrevendo a estrutura de dados da ferramenta DaltonTest.

### 4.1.2 Funcionamento

Durante o teste de daltonismo, são apresentadas, aleatoriamente, ao usuário imagens encontradas no teste de Ishihara na sua versão de 24 pranchas. O usuário, seguindo as instruções, deve responder às perguntas correspondentes às imagens apresentadas. Uma tela do sistema contendo uma imagem de uma prancha pseudoisocromática de demonstração pode ser observada na Figura 12.



**Figura 12.** Tela da Ferramenta de Teste apresentando uma prancha pseudoisocromática de demonstração.

Como cada questão possui um conjunto de respostas válidas, uma resposta não esperada é considerada inválida. Respostas inválidas não são contabilizadas, pois, supõe-se que o usuário não compreendeu a questão ou que o equívoco ocorreu por falta de atenção, e este tipo de resposta é irrelevante para o teste.

A avaliação, quando finalizada, apresenta o diagnóstico aproximado do daltonismo do usuário contendo quatro fatores: o grau de daltonismo, o grau de protanomalia, grau de deuteranomalia e o grau de monocromatismo. Este resultado, além de mostrar-se na tela para o usuário, é armazenado em um arquivo XML que, posteriormente, é lido pela ferramenta de correção, proporcionando assim, um caráter *fuzzy* para a aplicação.

## 4.2 Ferramenta de Simulação do Daltonismo

Para a realização dos experimentos, é importante conhecer como o daltonismo afeta a visualização de uma imagem. Apesar de existirem alguns simuladores de daltonismo no mercado, lembrando que sua maioria possui seu código fechado, é extremamente importante possuir o controle do problema e o conhecimento da representação matemática da simulação.

Para suprir a necessidade de um simulador de código aberto e de conhecer matematicamente como ocorrem as transformações que resultam na simulação de diferentes tipos de daltonismo, um simulador foi implementado utilizando a linguagem Python e as bibliotecas: PyQt, PIL [47], *Python Imaging Library*, contribuindo com várias funções de processamento de imagem e a NumPy [48], bastante utilizada para manipular matrizes.

A ferramenta, chamada de DaltonSim, permite a simulação dos casos mais comuns de dicromatismo: a protanopia, ausência de fotopigmentos sensíveis à luz vermelha e a deuteranopia, ausência de fotopigmentos sensíveis à luz verde.

### 4.2.1 Algoritmo de Simulação

O algoritmo de simulação de daltonismo é baseado no modelo de cor LMS (*Longwave, Middlewave, Shortwave*) [3]. Este modelo fundamenta-se na contribuição dos vários comprimentos de onda da luz na cor e representa o espaço de cor fotossensitivo do olho humano [49] [50].

A conversão dos componentes RGB para o modelo LMS é o primeiro passo do algoritmo e é dada pela transformação abaixo [3]:

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} = (RGB\_LMS) \begin{pmatrix} R_2 \\ G_2 \\ B_2 \end{pmatrix}, \quad (4.1)$$

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 17,8824 & 43,5161 & 4,11935 \\ 3,45565 & 27,1554 & 3,86714 \\ 0,0299566 & 0,184309 & 1,46709 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_2 \\ G_2 \\ B_2 \end{pmatrix}. \quad (4.1)$$

O segundo passo é a redução do domínio de cores normal para o domínio de cores de um portador de daltonismo. Esta redução mantém os valores correspondentes aos fotopigmentos

existentes no dicromata, como S e M para os portadores de protanopia e S e L para os portadores de deuteranopia.

A transformação linear para os protanopes é expressa da seguinte forma:

$$\begin{pmatrix} L_p \\ M_p \\ S_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 2,02344 & -2,52581 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix}, \quad (4.2)$$

e para os deuteranopes:

$$\begin{pmatrix} L_d \\ M_d \\ S_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,494207 & 0 & 1,24827 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix}. \quad (4.3)$$

Por fim, deve ocorrer a transformação do modelo de cor LMS para o RGB. Esta transformação é obtida utilizando a matriz inversa da matriz do primeiro passo. Abaixo é possível observar a transformação da matriz  $L_p M_p S_p$  para RGB. O mesmo dever ser feito para a matriz  $L_d M_d S_d$ .

$$\begin{pmatrix} R_p \\ G_p \\ B_p \end{pmatrix} = (RGB\_LMS)^{-1} \begin{pmatrix} L_p \\ M_p \\ S_p \end{pmatrix}, \quad (4.4)$$

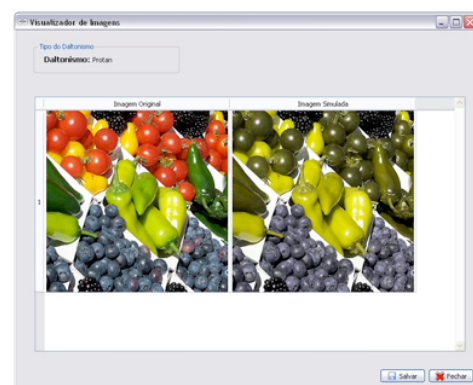
$$\begin{pmatrix} R_p \\ G_p \\ B_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,080944 & -0,130504 & 0,116721 \\ -0,0102485 & 0,0540194 & -0,113615 \\ -0,000365294 & -0,00412163 & 0,693513 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_p \\ M_p \\ S_p \end{pmatrix}. \quad (4.4)$$

## 4.2.2 Funcionamento

O DaltonSim possui uma interface (Figura 13.a) bastante simples, onde o usuário deve escolher o tipo de dicromatismo e as imagens que deseja simular. O resultado da simulação é a visualização das imagens originais juntamente com as imagens alteradas (Figura 13.b).



(a)

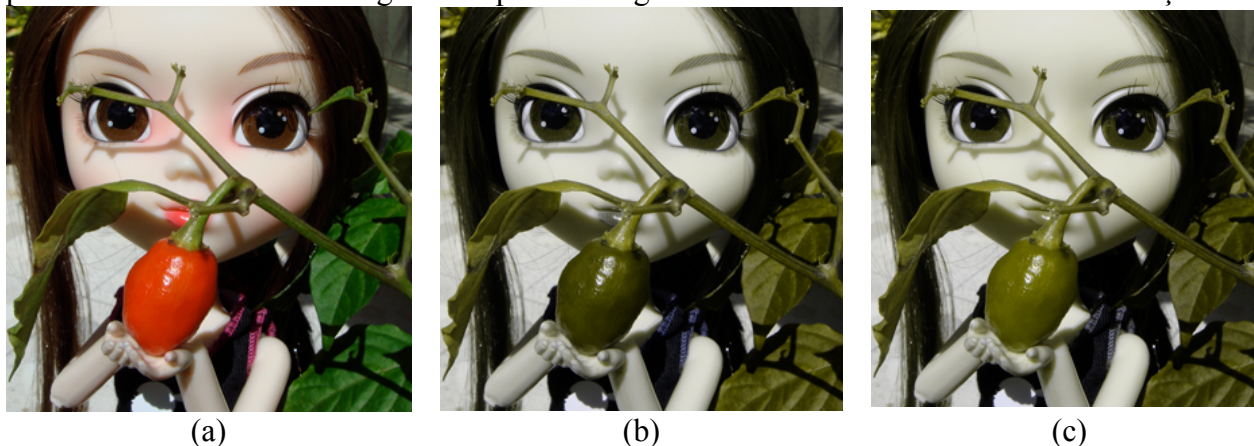


(b)

**Figura 13.** Telas da Ferramenta de Simulação. (a) Janela para definição dos parâmetros de simulação. (b) Janela de visualização dos resultados da simulação.



A simulação demonstrou-se essencial para entender os problemas de acessibilidade de um portador de daltonismo. A Figura 14 apresenta alguns resultados da Ferramenta de Simulação:



**Figura 14.** Resultado da simulação de dicromatismos. (a) Imagem original RGB, visão normal. (b) Imagem RGB simulando o daltonismo do tipo protan. (c) Imagem RGB simulando o daltonismo do tipo deutan.

## 4.3 Ferramenta de Correção

Através de estudos preliminares e de testes realizados com a ferramenta DaltonSim, ficou evidente a perda de informação visual existente nos casos mais comuns de daltonismo. A ferramenta de correção, DaltonCor, propõe-se, através do processamento digital de imagens, extrair as informações perdidas e melhorar a qualidade visual do portador de daltonismo, considerando que sua deficiência pode apresentar-se em diferentes graus.

Seguindo a linha das ferramentas de teste e simulação, a ferramenta de correção foi desenvolvida na linguagem Python e faz uso das bibliotecas: PyQt, PIL, NumPy e Equalize [51]. Esta última trata da equalização do histograma das imagens.

A ferramenta DaltonCor foi dividida em três módulos. O primeiro, Módulo Filtro, é responsável pela correção das imagens para protan's e deutan's, considerando que o distúrbio se apresenta de forma absoluta, em seu grau máximo (100%). O segundo, Módulo Fuzzy, considera o daltonismo em diferentes graus, e aplica Lógica Fuzzy para tornar a correção adaptável. E o terceiro, o Módulo de Controle, além de interligar os outros dois módulos, comunica-se com a interface gráfica e a alimenta com informações.

### 4.3.1 Método de Correção Proposto

A solução implementada no Módulo Filtro baseia-se na percepção das cores nos casos absolutos de daltonismo. A Tabela 3 mostra a representação das cores no modelo RGB. Foi observado que a ausência de um fotopigmento é compensada pela média dos outros dois, tornando, muitas vezes, imperceptível a variação de cores entre os elementos de uma imagem.



**Tabela 3.** Representação em RGB das cores nos casos absolutos de daltonismo.

	Normal	Protan	Deutan
<b>Branco</b>	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)
<b>Vermelho</b>	(1,0,0)	(0,0,0)	$(1, \frac{1}{2}, 0)$
<b>Verde</b>	(0,1,0)	$(\frac{1}{2}, 1, 0)$	(0,0,0)
<b>Azul</b>	(0,0,1)	$(\frac{1}{2}, 0, 1)$	$(0, \frac{1}{2}, 1)$
<b>Amarelo</b>	(1,1,0)	$(\frac{1}{2}, 1, 0)$	$(1, \frac{1}{2}, 0)$
<b>Magenta</b>	(1,0,1)	$(\frac{1}{2}, 0, 1)$	(1,1,1)
<b>Ciano</b>	(0,1,1)	(1,1,1)	$(0, \frac{1}{2}, 1)$

A proposta de correção procura compensar a falta de sensibilidade para uma determinada cor com novos valores para as cores com percepção normal. As equações a seguir representam a proposta de correção para o daltonismo do tipo protan.

Considere  $f = (f_r, f_g, f_b)$ , a imagem original seguida das suas três bandas de cor:  $r$ ,  $g$  e  $b$ . Sua correção ocorre através de duas equações. A primeira (4.5) trata de atribuir novos valores para as bandas de cor não afetadas pelo daltonismo. Para protans, essas bandas de cor são:  $f_g$  e  $f_b$ .

$$f' = (f_r, f_g', f_b'), \quad \begin{cases} f_g' = \frac{1}{2}(f_r + f_g) \\ f_b' = \frac{1}{2}(f_r + f_b) \end{cases} \quad (4.5)$$

Com o objetivo de aumentar a qualidade visual da imagem, a segunda equação (4.6) destina-se à melhora do contraste, onde a técnica escolhida foi equalização do histograma. Considere  $\gamma$  o otimizador de contraste.

$$f_p = (f_r, f_g'', f_b''), \quad \begin{cases} f_g'' = \gamma(f_g') \\ f_b'' = \gamma(f_b') \end{cases} \quad (4.6)$$

Observe que as equações de correção para deutans (4.7 e 4.8) são similares às apresentadas acima:

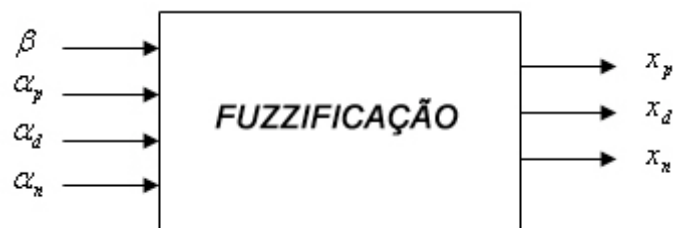
$$f' = (f_r', f_g', f_b'), \quad \begin{cases} f_r' = \frac{1}{2}(f_r + f_g) \\ f_b' = \frac{1}{2}(f_g + f_b) \end{cases} \quad (4.7)$$

$$f_d = (f_r'', f_g, f_b''), \quad \begin{cases} f_r'' = \gamma(f_r') \\ f_b'' = \gamma(f_b') \end{cases} \quad (4.8)$$

O Módulo de Filtro retorna duas imagens corrigidas:  $f_p$  e  $f_d$ . O Módulo Fuzzy é o responsável pela customização do filtro e, baseando-se no resultado da ferramenta de teste, atribui um caráter *fuzzy* a esta correção. O processo de *fuzzificação* está representado na Figura 15. Considere os parâmetros abaixo:

- $\beta$  - grau de daltonismo,
- $\alpha_p$  - grau de daltonismo do tipo protan,
- $\alpha_d$  - grau de daltonismo do tipo deutan,
- $\alpha_n$  - grau de normalidade,

onde os subscritos  $p$ ,  $d$  e  $n$  significam protan, deutan e normalidade.



**Figura 15.** *Fuzzificação* dos resultados obtidos através da Ferramenta de Teste.

A partir de uma abordagem experimental foram propostas as seguintes regras:

$$x_p' = \beta \wedge \alpha_p, \quad \text{onde } x_p' \text{ é igual ao grau de daltonismo e o grau de protan.} \quad (4.9)$$

$$x_d' = \beta \wedge \alpha_d, \quad \text{onde } x_d' \text{ é igual ao grau de daltonismo e o grau de deutan.} \quad (4.10)$$

$$x_n' = \alpha_n \wedge (\neg \beta), \quad \text{onde } x_n' \text{ é igual ao grau de normalidade e o não daltonismo.} \quad (4.11)$$

A partir das grandezas obtidas das regras citadas, pode-se fazer um processo de *fuzzificação* sobre essas grandezas para obter os pesos expressos pelas seguintes equações:

$$x_p = \frac{x_p'}{x_p' + x_d' + x_n'} \quad (4.12)$$

$$x_d = \frac{x_d'}{x_p' + x_d' + x_n'} \quad (4.13)$$

$$x_n = \frac{x_n'}{x_p' + x_d' + x_n'} \quad (4.14)$$

A imagem corrigida é uma média ponderada das imagens corrigidas para daltonismo do tipo protan, daltonismo do tipo deutan e da imagem original, como fica representada na seguinte expressão:

$$f_c = x_p \cdot f_p + x_d \cdot f_d + x_n \cdot f \quad (4.15)$$

Note que, nos casos em que uma pessoa for considerada totalmente normal para visão cromática, a imagem corrigida é idêntica a imagem original.

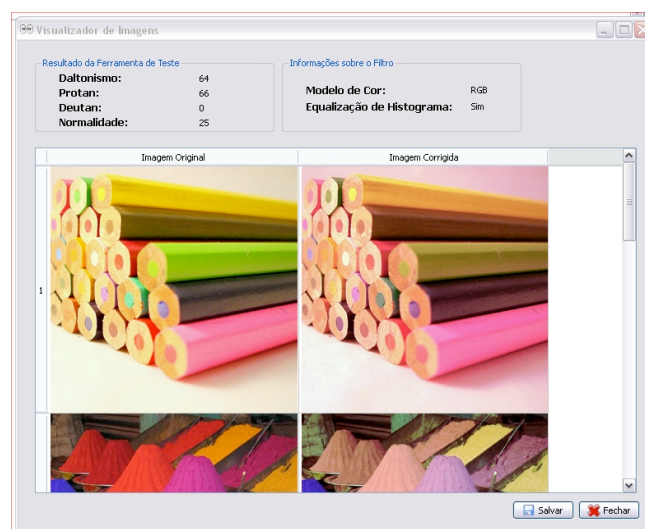
### 4.3.2 Resultados e Discussões

A ferramenta de correção, DaltonCor, possui uma interface gráfica intuitiva bastante simples de usar. A tela principal da ferramenta pode ser observada na Figura 16.



**Figura 16.** Tela principal da Ferramenta de Correção.

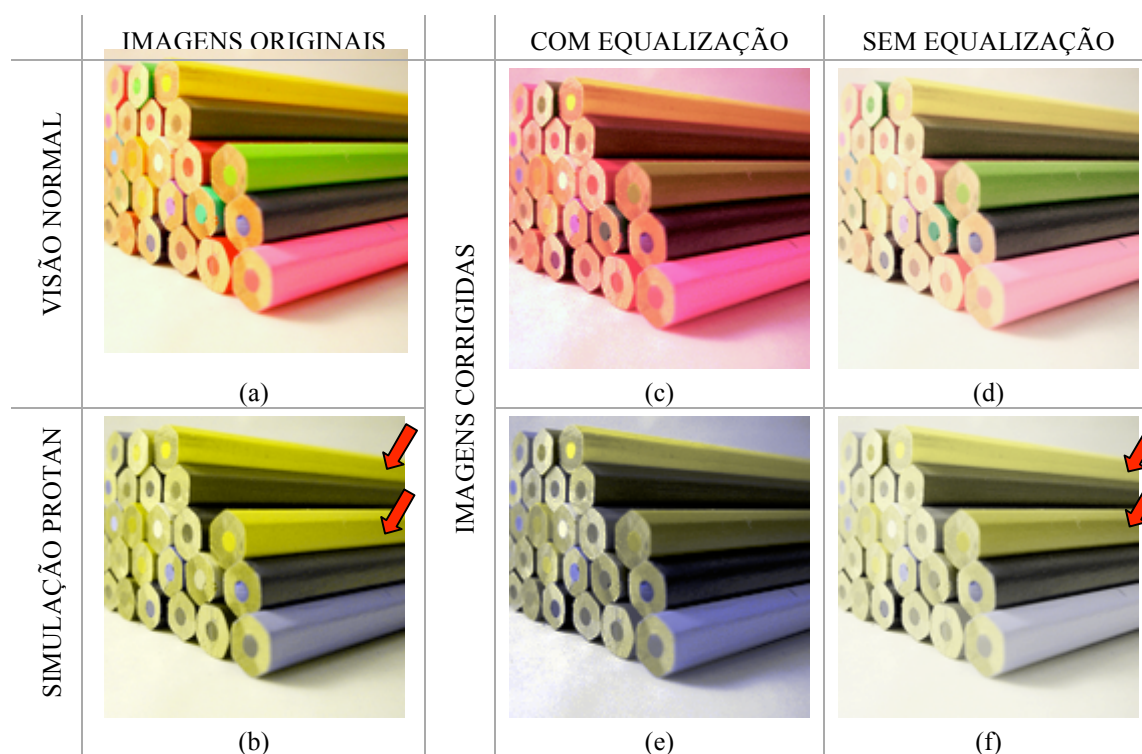
Os resultados do teste de daltonismo podem ser lidos pela ferramenta de correção ou simplesmente inseridos manualmente. Deve-se escolher o modelo de cor a ser utilizado e se deseja equalizar o histograma ou não. Várias imagens podem ser corrigidas simultaneamente e o resultado é exibido em uma tela de visualização (Figura 17). Esta permite que as imagens já corrigidas possam ser salvas.



**Figura 17.** Tela de visualização das imagens corrigidas.

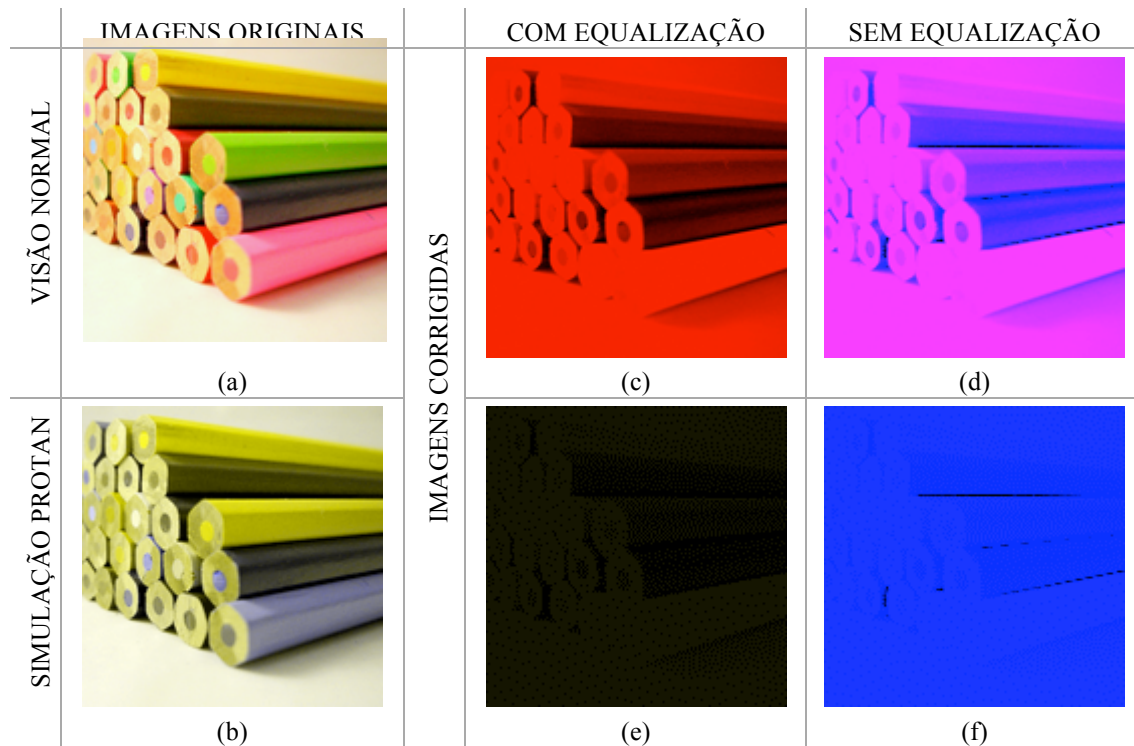
Para analisar os resultados da Ferramenta de Correção proposta, foram utilizadas dez imagens de 300 *pixels* de largura por 300 *pixels* de altura de formato bitmap-32bits. O uso da ferramenta de simulação foi essencial para entender como as correções seriam percebidas pelos portadores de daltonismo. Também foram analisadas todas as variações de correção: em RGB, LMS e com e sem equalização de histograma. Das dez imagens utilizadas, cinco foram selecionadas para representar neste trabalho os resultados, utilizando as diferentes formas de correção.

Da Figura 18 até a Figura 27 podem ser observados os resultados de correção para um indivíduo 100% daltônico, 100% protan, 0% deutan e 0% normal. E da Figura 28 até a Figura 37 podem ser observados os resultados de correção para um indivíduo 100% daltônico, 0% protan, 100% deutan e 0% normal.

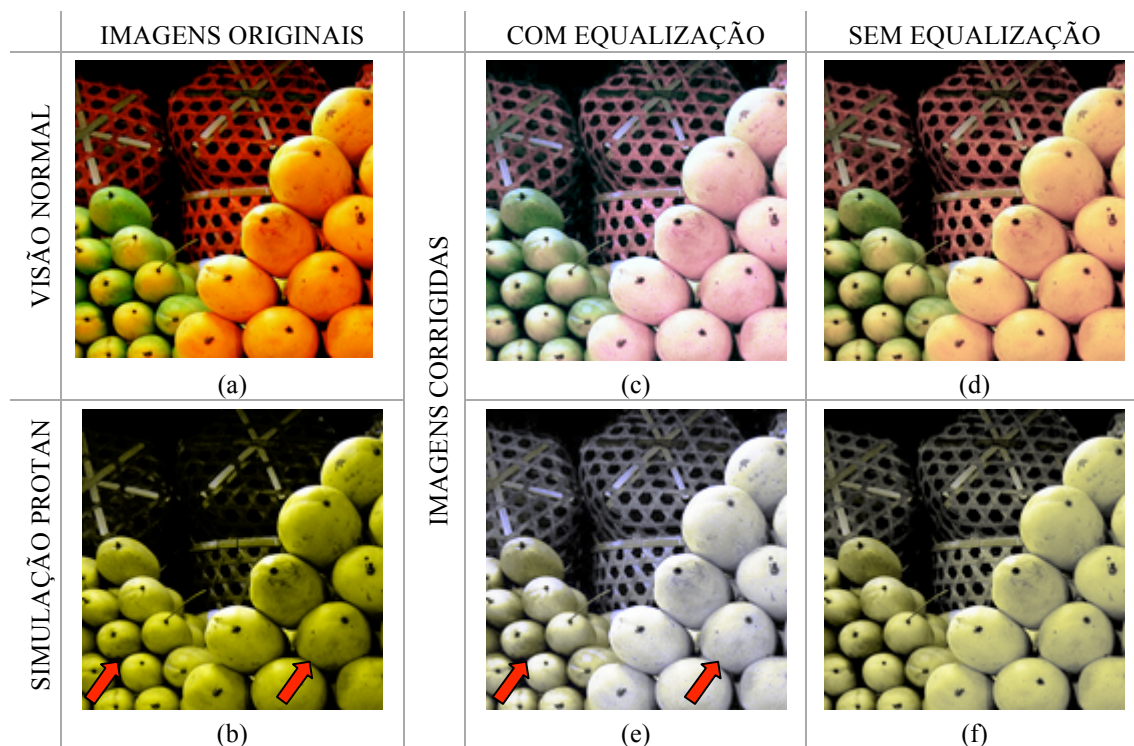


**Figura 18.** Resultado da correção de imagem utilizando o método em RGB. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo protan.

Observe que, na Figura 18.b, as tonalidades dos lápis apontados pelas setas parecem praticamente as mesmas. Já na Figura 18.e, as tonalidades dos lápis estão sutilmente diferentes. O mesmo acontece na Figura 20.e, onde é fácil perceber o ganho de informação visual após a correção da imagem.

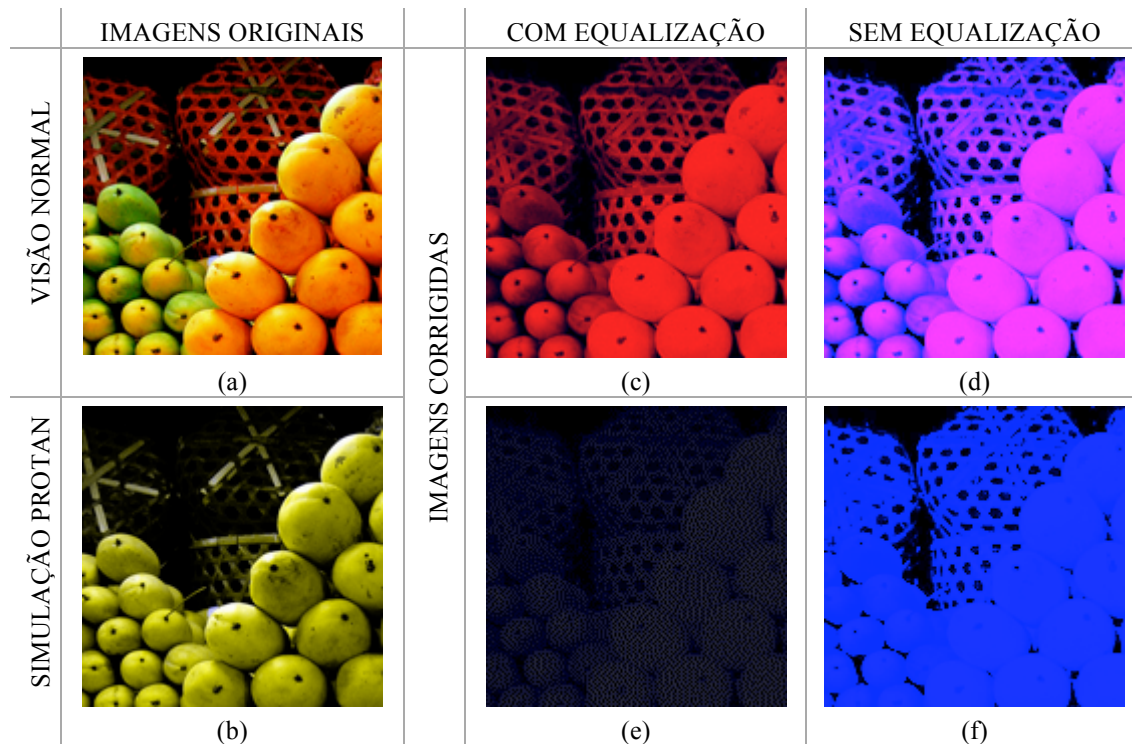


**Figura 19.** Resultado da correção de imagem utilizando o método em LMS. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo protan.

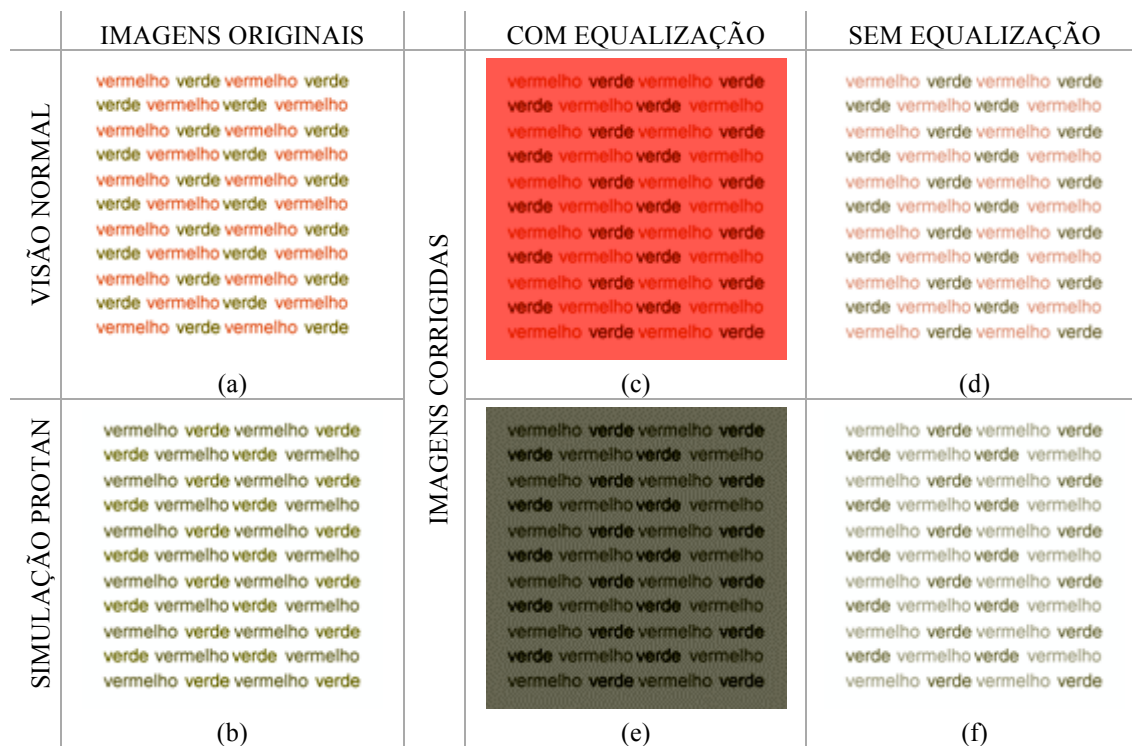


**Figura 20.** Resultado da correção de imagem utilizando o método em RGB. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo protan.











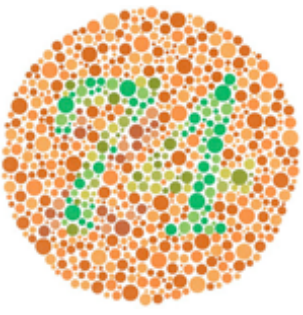
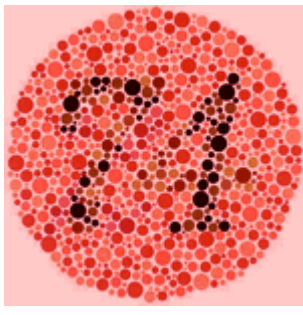
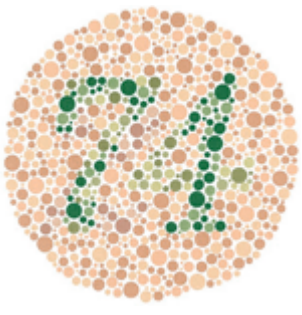
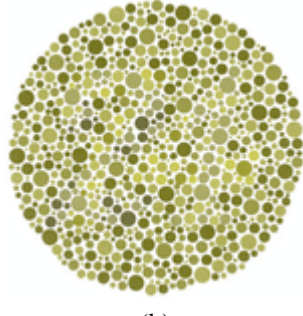
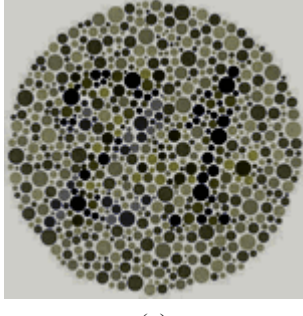
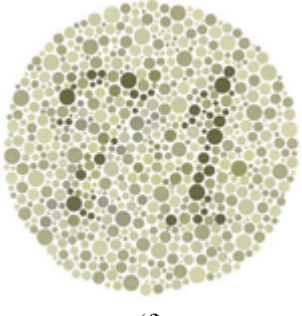
**Figura 21.** Resultado da correção de imagem utilizando o método em LMS. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo protan.



**Figura 22.** Resultado da correção de imagem utilizando o método em RGB. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo protan.

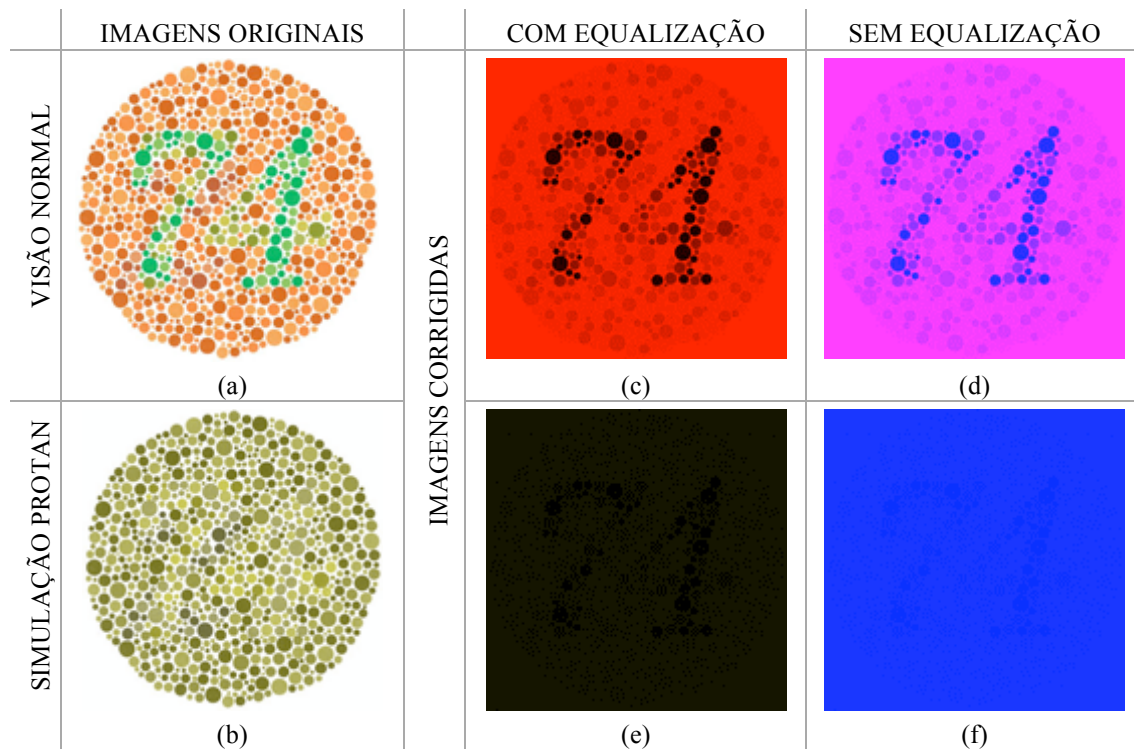
	IMAGENS ORIGINAIS		COM EQUALIZAÇÃO	SEM EQUALIZAÇÃO
VISÃO NORMAL	 <p>(a)</p>	IMAGENS CORRIGIDAS	 <p>(c)</p>	 <p>(d)</p>
SIMULAÇÃO PROTAN	 <p>(b)</p>		 <p>(e)</p>	 <p>(f)</p>

**Figura 23.** Resultado da correção de imagem utilizando o método em LMS. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo protan.

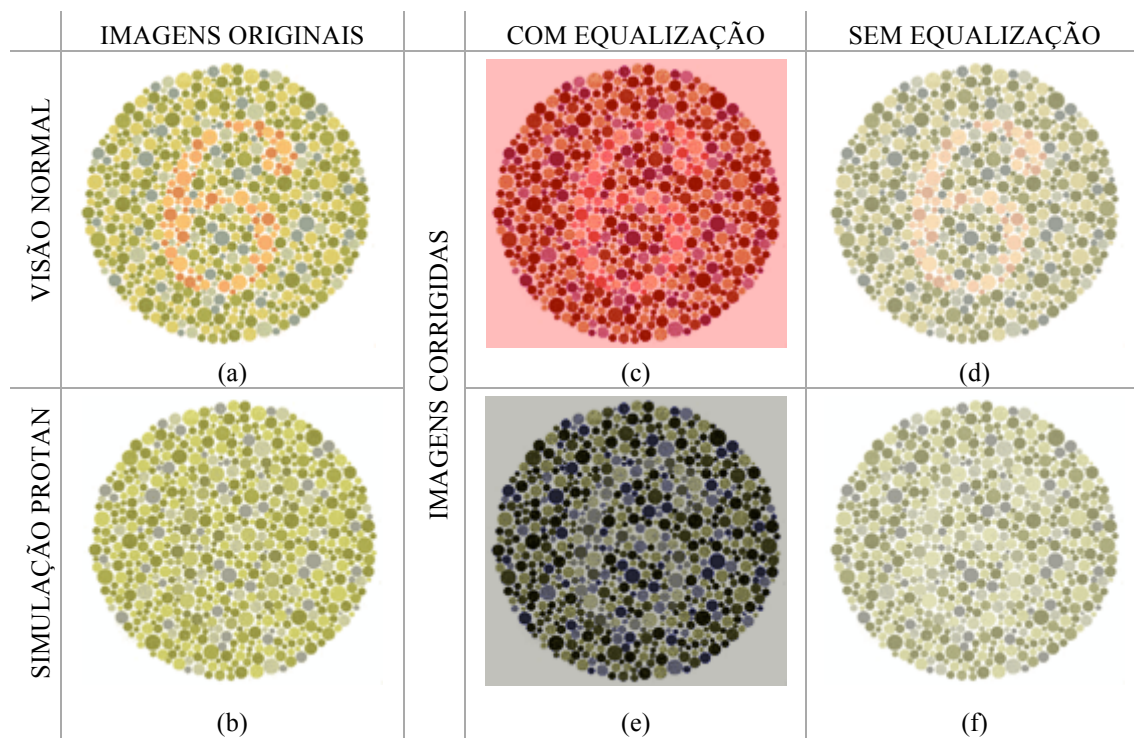
	IMAGENS ORIGINAIS		COM EQUALIZAÇÃO	SEM EQUALIZAÇÃO
VISÃO NORMAL	 <p>(a)</p>	IMAGENS CORRIGIDAS	 <p>(c)</p>	 <p>(d)</p>
SIMULAÇÃO PROTAN	 <p>(b)</p>		 <p>(e)</p>	 <p>(f)</p>

**Figura 24.** Resultado da correção de imagem utilizando o método em RGB. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo protan.

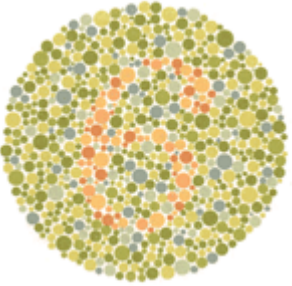
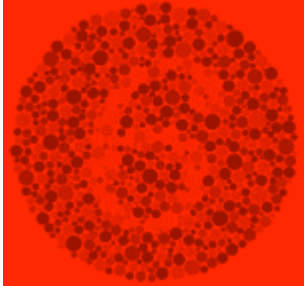
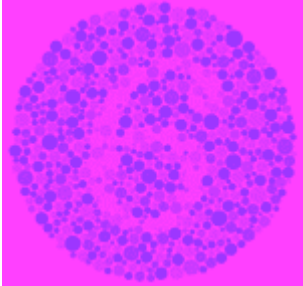
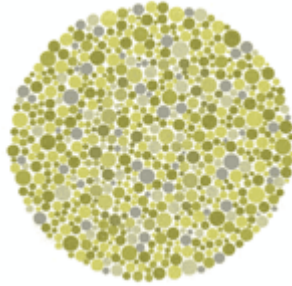









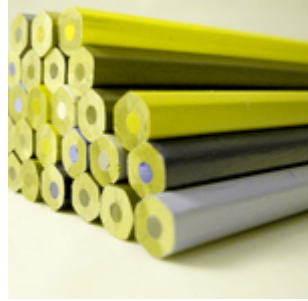
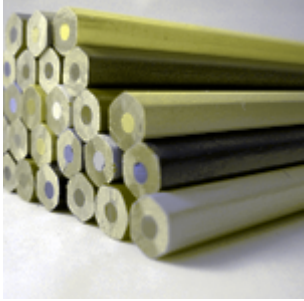
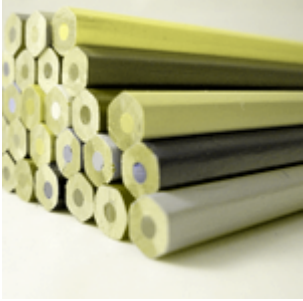
**Figura 25.** Resultado da correção de imagem utilizando o método em LMS. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo protan.



**Figura 26.** Resultado da correção de imagem utilizando o método em RGB. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo protan.


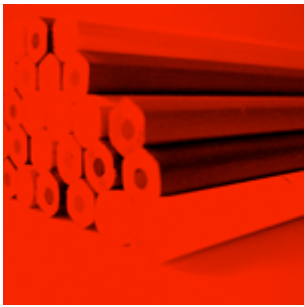
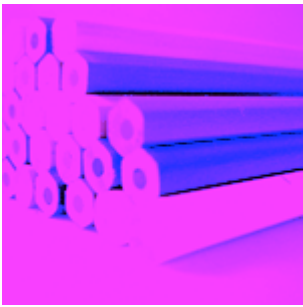
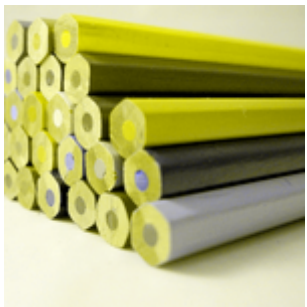

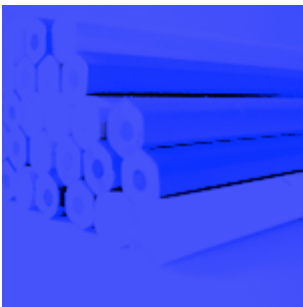
	IMAGENS ORIGINAIS		COM EQUALIZAÇÃO	SEM EQUALIZAÇÃO
VISÃO NORMAL	 (a)	IMAGENS CORRIGIDAS	 (c)	 (d)
SIMULAÇÃO PROTAN	 (b)		 (e)	 (f)

**Figura 27.** Resultado da correção de imagem utilizando o método em LMS. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo protan.




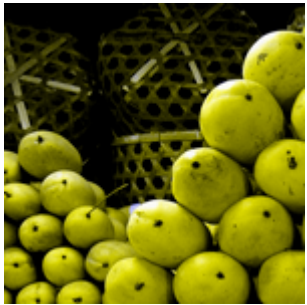
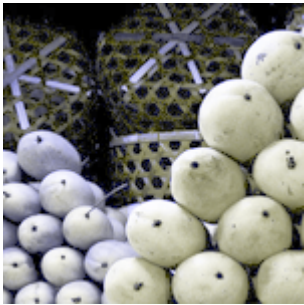
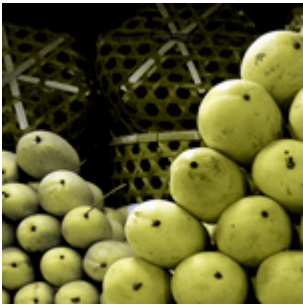
	IMAGENS ORIGINAIS		COM EQUALIZAÇÃO	SEM EQUALIZAÇÃO
VISÃO NORMAL	 (a)	IMAGENS CORRIGIDAS	 (c)	 (d)
SIMULAÇÃO DEUTAN	 (b)		 (e)	 (f)

**Figura 28.** Resultado da correção de imagem utilizando o método em RGB. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo deutan.

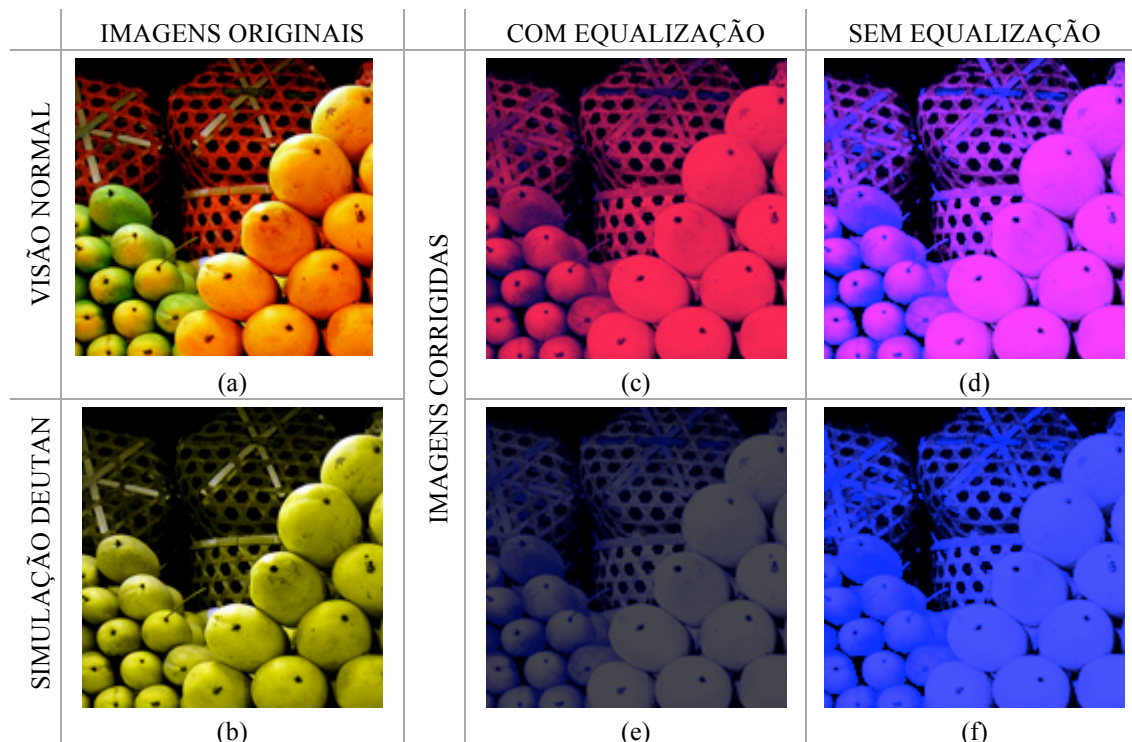


	IMAGENS ORIGINAIS		COM EQUALIZAÇÃO	SEM EQUALIZAÇÃO
VISÃO NORMAL	 (a)	IMAGENS CORRIGIDAS	 (c)	 (d)
SIMULAÇÃO DEUTAN	 (b)		 (e)	 (f)

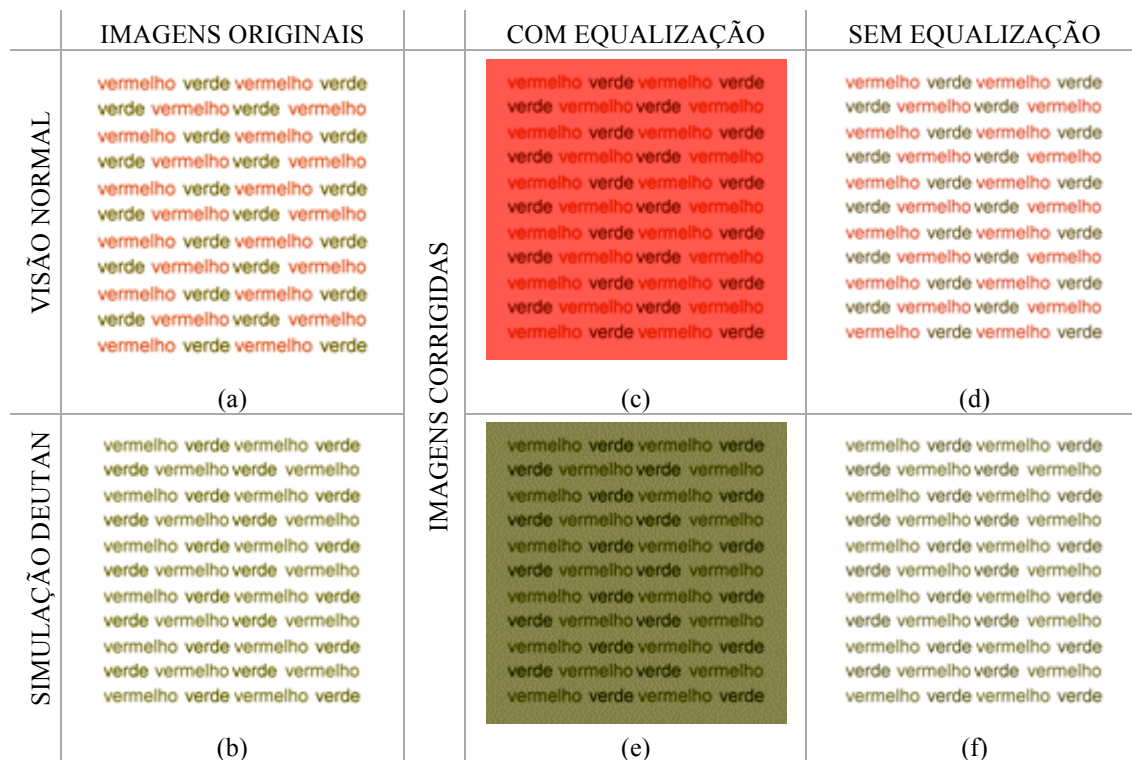
**Figura 29.** Resultado da correção de imagem utilizando o método em LMS. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo deutan.

	IMAGENS ORIGINAIS		COM EQUALIZAÇÃO	SEM EQUALIZAÇÃO
VISÃO NORMAL	 (a)	IMAGENS CORRIGIDAS	 (c)	 (d)
SIMULAÇÃO DEUTAN	 (b)		 (e)	 (f)

**Figura 30.** Resultado da correção de imagem utilizando o método em RGB. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo deutan.









**Figura 31.** Resultado da correção de imagem utilizando o método em LMS. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo deutan.

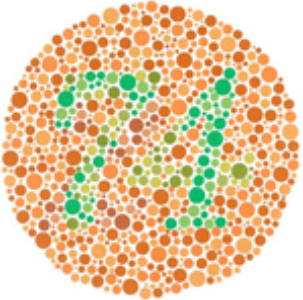
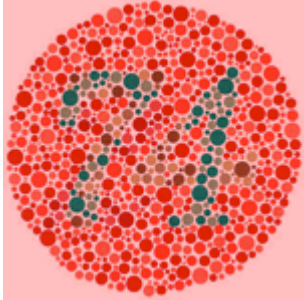
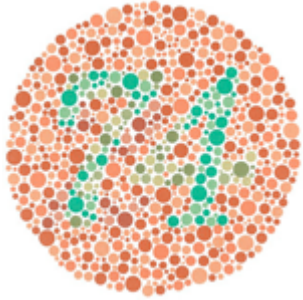
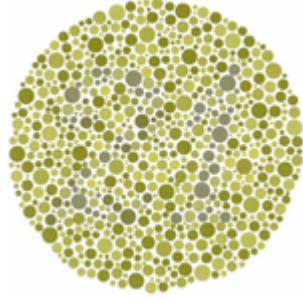
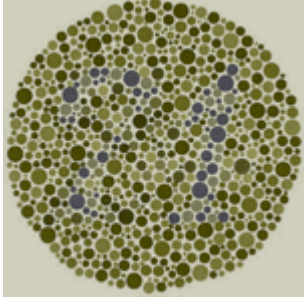
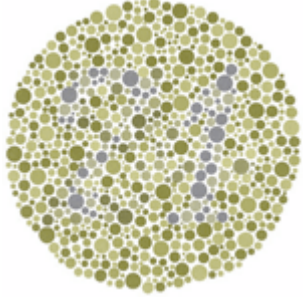


**Figura 32.** Resultado da correção de imagem utilizando o método em RGB. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo deutan.

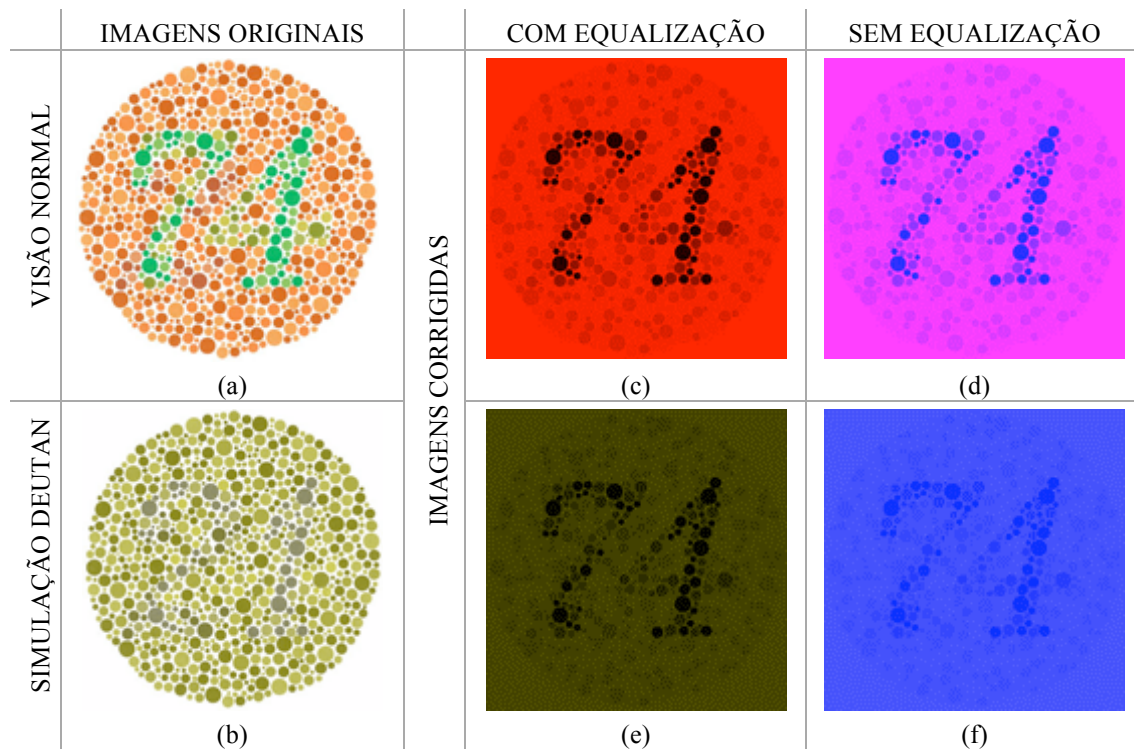


	IMAGENS ORIGINAIS		COM EQUALIZAÇÃO	SEM EQUALIZAÇÃO
VISÃO NORMAL	 <p>(a)</p>	IMAGENS CORRIGIDAS	 <p>(c)</p>	 <p>(d)</p>
SIMULAÇÃO DEUTAN	 <p>(b)</p>		 <p>(e)</p>	 <p>(f)</p>

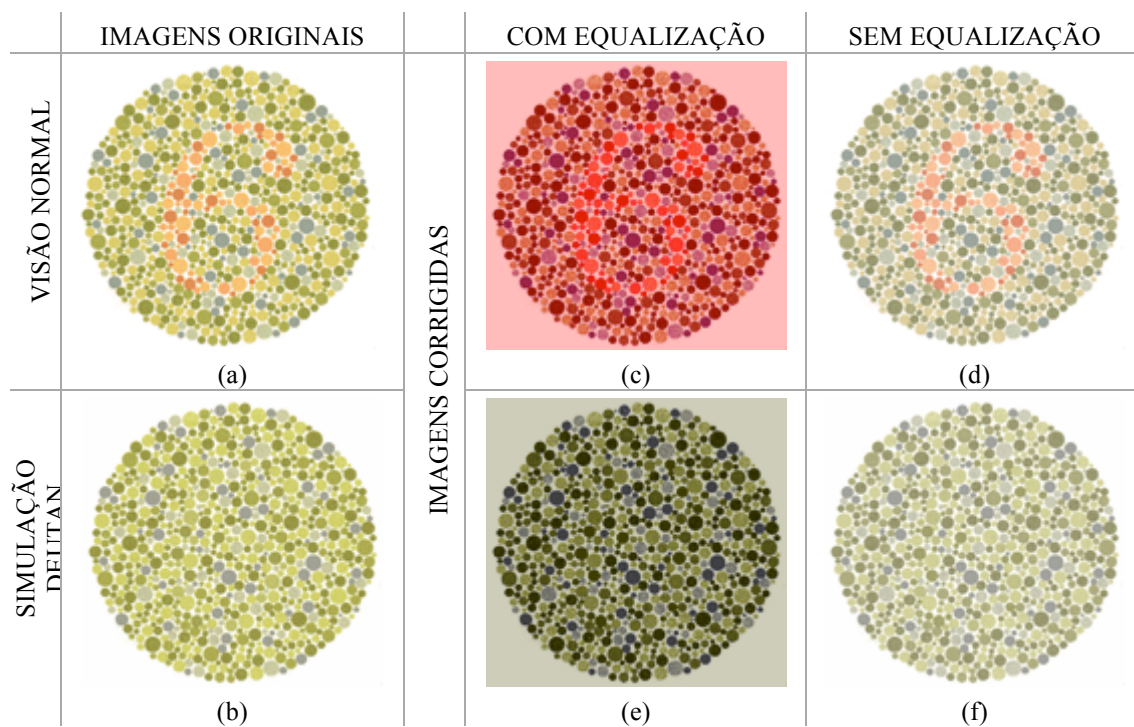
**Figura 33.** Resultado da correção de imagem utilizando o método em LMS. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo deutan.

	IMAGENS ORIGINAIS		COM EQUALIZAÇÃO	SEM EQUALIZAÇÃO
VISÃO NORMAL	 <p>(a)</p>	IMAGENS CORRIGIDAS	 <p>(c)</p>	 <p>(d)</p>
SIMULAÇÃO DEUTAN	 <p>(b)</p>		 <p>(e)</p>	 <p>(f)</p>

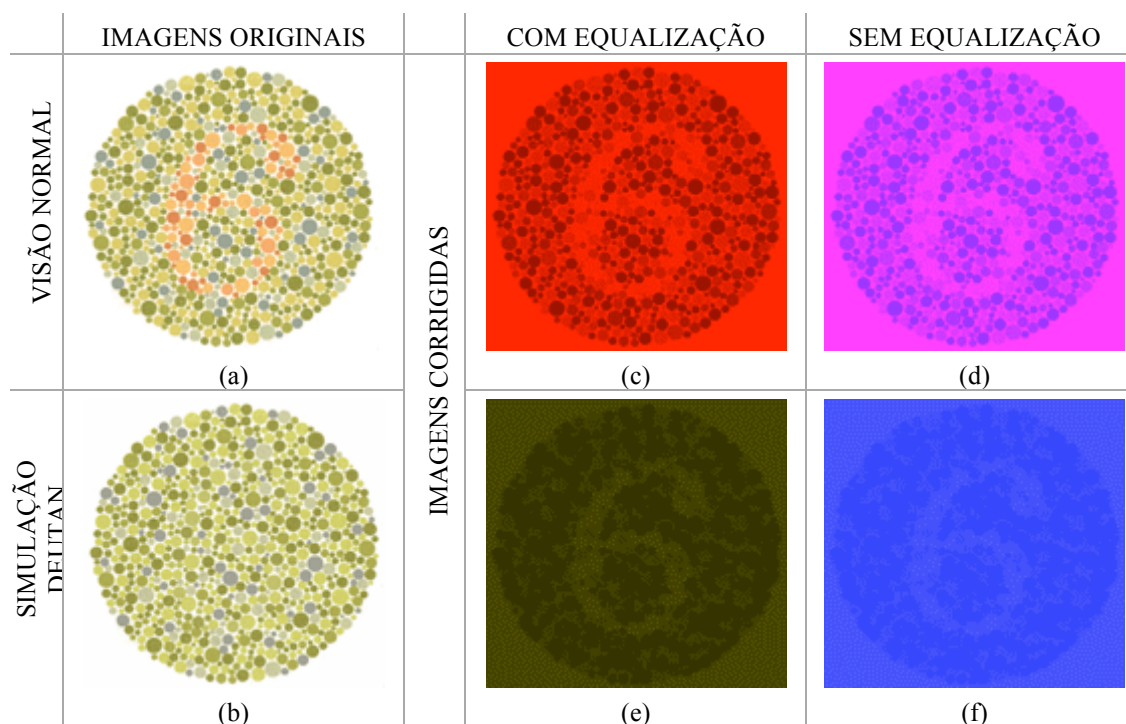
**Figura 34.** Resultado da correção de imagem utilizando o método em RGB. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo deutan.



**Figura 35.** Resultado da correção de imagem utilizando o método em LMS. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo deutan.



**Figura 36.** Resultado da correção de imagem utilizando o método em RGB. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo deutan.



**Figura 37.** Resultado da correção de imagem utilizando o método em LMS. (a) e (b) Imagens originais para visão normal e simulada. (c) e (d) Imagens corrigidas com e sem equalização de histograma. (e) e (f) Imagens corrigidas e simuladas para o daltonismo deutan.

Apesar da análise feita através do simulador mostrar-se satisfatória, um grupo de quatro portadores de daltonismo se voluntariou para testar a ferramenta. Os voluntários foram submetidos ao teste customizado de Ishihara, utilizando a ferramenta de teste. Através dos resultados obtidos, as quatro combinações de correção foram analisadas.

Cada imagem corrigida foi avaliada e julgada subjetivamente em: muito melhor, melhor, igual, pior ou muito pior. Foram considerados critérios como distorção e maior capacidade de distinção de elementos em relação à imagem original.

**Tabela 4.** Resultado da análise dos filtros de correção.

		Com equalização		Sem equalização	
RGB	Muito melhor	20%	Muito melhor	0%	
	Melhor	46%	Melhor	43%	
	Igual	20%	Igual	43%	
	Pior	14%	Pior	14%	
	Muito pior	0%	Muito pior	0%	
LMS	Muito melhor	20%	Muito melhor	7%	
	Melhor	17%	Melhor	33%	
	Igual	0%	Igual	3%	
	Pior	7%	Pior	7%	
	Muito pior	36%	Muito pior	50%	

Foi observado que com a correção em RGB e equalização de histograma, as imagens tornaram-se mais compreensíveis, pois elementos, que antes eram percebidos com a mesma cor, devido ao daltonismo, receberam cores diferentes. Algumas imagens, após a correção,



apresentaram menos saturação nas suas cores e em alguns desses casos foram consideradas piores. Com a correção em RGB sem a equalização do histograma não houve um grande ganho na melhora visual das imagens, apesar deste tipo de correção ter sido considerado o que causou menos impacto negativo em relação à distorção das cores originais.

A correção em LMS, de uma forma geral, alterou demasiadamente as cores originais das imagens, embora tenha se apresentado eficiente em imagens que possuem elementos propositalmente escondidos, como as imagens utilizadas nas pranchas pseudoisocromáticas de Ishihara.

## Capítulo 5

# Conclusões e Trabalhos Futuros

Apesar da rápida evolução tecnológica e dos avanços da área de processamento digital de imagens, especificamente na sua área de aplicação que trata da melhoria de informação visual para a interpretação humana, não é fácil encontrar ferramentas que diminuam os efeitos de distúrbios visuais cromáticos. Neste sentido, esse trabalho propôs o desenvolvimento de um conjunto de ferramentas computacionais visando melhorar a acessibilidade e a qualidade visual de um portador de daltonismo.

Foi desenvolvida uma ferramenta de teste de daltonismo. O método de avaliação utilizado foi o teste de Ishihara devido a sua grande popularidade. Porém, uma nova abordagem foi adotada no teste: o uso de Lógica Fuzzy. Esta permitiu à ferramenta, além de detectar o distúrbio, avaliar aproximadamente em que grau ele se encontra.

Uma ferramenta adaptativa foi desenvolvida para atuar na melhora da informação visual de imagens digitais de um portador de deficiência cromática. Foram propostas soluções de correção baseadas no modelo de cor RGB e LMS e de melhora do contraste com a equalização do histograma da imagem.

Como parte complementar do estudo, foi desenvolvida uma ferramenta de simulação do daltonismo nos tipos protans e deutans. Esta ferramenta foi utilizada para compreender o comportamento visual cromático de um portador de daltonismo e avaliar com mais precisão os resultados obtidos com a Ferramenta de Correção.

Testes foram realizados com um grupo voluntário composto de quatro portadores de daltonismo. Esta experiência foi importante para avaliar os resultados obtidos através dos filtros de correção, além de poder aferir com mais exatidão as dificuldades encontradas pelos voluntários. Os resultados foram bastante positivos, comprovando que a proposta de correção utilizada é capaz de extrair um número maior de informações de uma imagem.

A correção em RGB com equalização de histograma resultou em um maior melhora nas imagens avaliadas. Enquanto que a mesma correção sem a equalização destacou-se por não distorcer em excesso as cores originais. Os filtros em LMS com e sem equalização de histograma, apesar de resultar em uma imagem bastante diferente da original, conseguiu extrair informações propositalmente camufladas.

Além disso, todas as ferramentas mostraram-se intuitivas e fáceis de usar, o que proporciona uma melhor experiência do usuário e, conseqüentemente, seu uso habitual.

## 5.1 Trabalhos Futuros

Para a Ferramenta de Teste, seria válido considerar outros métodos menos populares de diagnóstico de distúrbios cromáticos. O teste de pranchas pseudoisocromáticas da *American Optical Hardy-Rand-Rittler*, apesar de apresentar falso-positivos em diagnosticar deficiências vermelho-verde, poderia contribuir com sua capacidade de detectar problemas visuais cromáticos para a cor azul. Testes subjetivos como: testes de arranjo e testes de nomeação poderiam ser utilizados em conjunto para que os resultados se apresentassem mais confiáveis.

Seria também interessante, analisar a proposta de correção utilizando outros sistemas de cores, como: XYZ, CMY, HIS, etc.

Uma sugestão de trabalho futuro também é a implementação do simulador de daltonismo utilizando Lógica Fuzzy, assim, através dos testes de diagnóstico seria possível simular com mais realidade a visão do portador de daltonismo. Outra funcionalidade interessante seria a simulação do daltonismo do tipo tritan.

Outra sugestão seria a implementação da biblioteca de filtros de simulação e correção na linguagem C. Esta opção traria um ganho de desempenho em relação ao Python, a atual linguagem utilizada.

Para uma melhor avaliação das imagens corrigidas, mais testes poderiam ser realizados com os portadores de daltonismo. Como o grupo de voluntários foi pequeno, não é possível analisar com precisão os resultados encontrados. Além disso, o número de imagens avaliadas é bastante reduzido. Um trabalho futuro seria uma avaliação mais precisa, com um número mais relevante de portadores de daltonismo e uma base de imagens maior.

## Bibliografia

- [1] JORGE, L., VIEIRA, P., MANTOVANI, E. Avaliação em atributos em lotes de sementes de milho através do Siarcs 3.02. *Circular Técnica Embrapa*, São Paulo, n. 9, 1998.
- [2] PIMENTEL FILHO, C. A. F.; MONTALVÃO J; REHEM NETO A. Um Estudo de Segmentação de Imagens Baseado em Textura. In: III Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação, 2006, Curitiba. *Anais do III Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação*, v. 01. p. 12-12, 2006.
- [3] VIÉNOT, F., BRETTEL, H., MOLLON, J. Digital Video Colourmaps for Checking the Legibility of Displays by Dichromats. *COLOR Research and Application*, v. 24, n. 4, pp. 243-252, Agosto de 1999.
- [4] JENNY, B., KELSO, N. Color Design for the Color Vision Impaired. *Cartographic Perspectives*, 58, pp. 61-67, 2007.
- [5] HOFFMAN, P.S. Accommodating Color Blindness. *Usability SIG Newsletter of STC*, v. 6, n. 2, jul. 1999. Disponível em: <<http://www.stcsig.org/usability/newsletter/9910-color-blindness.html>>. Acesso em 5 de fevereiro de 2008.
- [6] BRUNI, L. F., CRUZ, A. A. V. Chromatic sense: types of defects and clinical evaluation tests. *Arq. Bras. Oftalmol.*, São Paulo, v. 69, n. 5, 2006.
- [7] GONZALEZ, R., WOODS, R. *Processamento de Imagens Digitais*. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.
- [8] BICAS, Haley. Morfologia do Sistema Visual. *Medicina*, Ribeirão Preto, 30: 7-15, jan./mar. 1997.
- [9] AMABIS, J.M. e MARTHO, G.R. *Biologia dos Organismos: A diversidade dos seres vivos*. 2. ed. São Paulo: Moderna, p. 561-564, 2004.
- [10] SHOAFF, W. D. Color, Illumination Models and Shading, 2002. Disponível em: <<http://www.cs.fit.edu/~wds/classes/graphics/Illuminate/illuminate/>>. Acesso em 24 de maio de 2008.
- [11] MOÇO, F. Luz e Cor. Escola Dr Joaquim de Carvalho. Disponível em: <http://esb3-djcarvalho.edu.pt/departamentos/informatica/aib/aib-11ab/efeme/ai-b/AI-B-03-Luz%20e%20Cor.pdf>>. Acesso em 3 de março de 2008.
- [12] PEDRINI, H., Schwartz, W. *Análise de Imagens Digitais: Princípios, Algoritmos e Aplicações*. São Paulo: Thomson Learning, 2008.
- [13] FERNANDES, L. C., URBANO, L. C. V. Absorptive and colored contact lenses in color-vision defects: case report. *Arquivos Brasileiros de Oftalmologia*, São Paulo, v. 66, n. 3, 2003 . Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0004-27492003000300024&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-27492003000300024&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em 27 de fevereiro de 2008.
- [14] SATO, M. T. et al . Congenital dyschromatopsias and driving. *Arquivos Brasileiros de Oftalmologia*, São Paulo, v. 65, n. 1, 2002 . Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0004-27492002000100010&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-27492002000100010&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em 27 de fevereiro de 2008.

- [15] ARAÚJO, K. Qualificação Profissional no Desenvolvimento e Controle de Qualidade Visual das Cores.
- [16] JEFFERSON, L., HARVEY, R. An Interface to Support Color Blind Computer Users. *CHI*, California, USA, 2007.
- [17] CALIARI, J.V. Rastreamento de Discromatopsia em Estudantes do Ensino Básico de uma Escola da Rede Pública Municipal de Florianópolis. Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- [18] AZEVEDO M., SANTOS, M., OLIVEIRA, R. O Uso da Cor no Ambiente de Trabalho: Uma Ergonomia da Percepção. *Ensaio de Ergonomia, Revista Virtual de Ergonomia*, 2000. Disponível em: <<http://www.eps.ufsc.br/ergon/revista/artigos/rubia.PDF>>. Acesso em 29 de março de 2008.
- [19] Quando não se consegue perceber as cores. *Jornal Saúde & Lazer*, ago, 2007. Disponível em: <[http://www.saudelazer.com/index.php?option=com\\_content&task=view&id=588&Itemid=49](http://www.saudelazer.com/index.php?option=com_content&task=view&id=588&Itemid=49)>. Acesso em 31 de março de 2008.
- [20] JEFFERSON, L., HARVEY, R. Accommodating Color Blind Computer Users. *ASSETS 2006 - The Eighth International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, Portland, Oregon, 2006.
- [21] ASES, Avaliador e Simulador de Acessibilidade de Sítios. Disponível em: <https://www.governoeletronico.gov.br/acoes-e-projetos/e-MAG/ases-avaliador-e-simulador-de-acessibilidade-sitios>. Acesso em 6 de abril de 2008.
- [22] OSCIP, o que é? Disponível em: <<http://www.sebraeminas.com.br/culturadacooperacao/oscip/02.htm>>. Acesso em 6 de abril de 2008.
- [23] FORTIN, M. Sim Daltonism. Disponível em: <<http://michelf.com/projects/sim-daltonism>>. Acesso em 6 de abril de 2008.
- [24] COLORDOCTOR. Disponível em: <<http://www.fujitsu.com/global/accessibility/assistance/cd>>. Acesso em 6 de abril de 2008.
- [25] VISCHECK PHOTOSHOP PLUG-IN FOR WINDOWS. Disponível em: <<http://www.vischeck.com>>. Acesso em 6 de abril de 2008.
- [26] NEW PIGMENT. Disponível em: <<http://new-pigment.lastdownload.com>>. Acesso em 7 de abril de 2008.
- [27] EYEPILLOT. Disponível em: <<http://www.colorhelper.com/>>. Acesso em 7 de abril de 2008.
- [28] NORVIG, P., RUSSELL, S. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Nova Jersey: Prentice-Hall, 1995.
- [29] CONTE, L., PEZZIN, M. Reconhecimento de crachás utilizando técnicas de visão computacional e Lógica Fuzzy. Universidade do Contestado, Santa Catarina. Disponível em: <<http://www.dcc.unesc.net/sulcomp/05/Art079SulComp2005.pdf>>. Acesso em 7 de abril de 2008.
- [30] JANÉ, M. A. Uma Introdução ao Estudo da Lógica Fuzzy. *Hórus: Revista de Humanidades e Ciências Sociais Aplicadas*, São Paulo, 2004, n.2. Disponível em: <[http://www.faesio.edu.br/horus/artigos%20anteriores/2004/artigo\\_dario.pdf](http://www.faesio.edu.br/horus/artigos%20anteriores/2004/artigo_dario.pdf)>. Acesso em 7 de abril de 2008.
- [31] CAMARGOS, F. Lógica Nebulosa: uma abordagem filosófica e aplicada. Federal e Santa Catarina, Santa Catarina, 2002. Disponível em: <<http://www.inf.ufsc.br/~barreto/trabaluno/IAfernandoLC.pdf>>. Acesso em 7 de abril de 2008.
- [32] GABRIEL, C. P. *et al.* Um Controlador Fuzzy para a Racionalização de Energia. FUNDACTE, São Paulo. Disponível em: <<http://www.mat.ufpr.br/ermac/ermacdb/resumos/0630192249.pdf>>. Acesso em 20 de abril de 2008.

- [33] SANTOS, W. P. *Análise de Imagens Digitais em Patologia Utilizando Morfologia Matemática e Lógica Nebulosa*. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.
- [34] CAMARGO, M. A. Conjuntos Fuzzy: Conceito recente na teoria dos conjuntos. Disponível em: <<http://educacao.uol.com.br/matematica/ult1705u12.jhtm>>. Acesso em 21 de abril de 2008.
- [35] TAKAHASHI, H. J. *Predição de Propriedades Mecânicas de Aços de Alta Resistência Microligados Utilizando Técnicas de Inteligência Computacional*. Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, Coronel Fabriciano, 2006. Disponível em: <[http://www.unilestemg.br/posgraduacao/mestrado/arquivos/Dissert002\\_Hiroshi.pdf](http://www.unilestemg.br/posgraduacao/mestrado/arquivos/Dissert002_Hiroshi.pdf)>. Acesso em 21 de abril de 2008.
- [36] FIGUEIREDO, L. C. *Lógica Fuzzy*. Centro Universitário do Leste de Minas Gerais. Disponível em: <[http://professores.unilestemg.br/~figueiredo/guia\\_ia3.pdf](http://professores.unilestemg.br/~figueiredo/guia_ia3.pdf)>. Acesso em 27 de abril de 2008.
- [37] SANDRINI, S., CORREA, C. *Lógica Nebulosa*. V Escola de Redes Neurais, Promoção: Conselho Nacional de Redes Neurais - ITA, São José dos Campos – São Paulo, pp. c073-c090, 19 de julho, 1999.
- [38] ANTUNES, J. *Lógica Nebulosa para avaliar riscos na auditoria*. *Anais do 5º Congresso USP de Controladoria e Contabilidade*, São Paulo, 2005.
- [39] PIRES, J. R. C., NASCIMENTO JÚNIOR, C. L. *Controle Fuzzy para Braço Robótico Utilizando uma Abordagem Adaptativa Neuro-Fuzzy (Afins) do MatLab*. Disponível em: <<http://www.bibl.ita.br/viiiencita/Controle%20fuzzy%20para%20braco%20robotico%20utilizando%20anfis%20do%20matlab.pdf>>. Acesso em 4 de maio de 2008.
- [40] Python Programming Language. Disponível em: <<http://www.python.org>>. Acesso em 5 de maio de 2008.
- [41] Python. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Python>>. Acesso em 5 de maio de 2008.
- [42] GNU General Public License. Disponível em: <<http://www.gnu.org/licenses/gpl.html>>. Acesso em 5 de maio de 2008.
- [43] PyQt, bindings da biblioteca Qt para Python. Disponível em: <<http://www.pythonbrasil.com.br/moin.cgi/ComoUsarPyQt>>. Acesso em 7 de maio de 2008.
- [44] Qt Cross-Platform Application Framework. Disponível em: <<http://trolltech.com/products/qt>>. Acesso em 5 de maio de 2008.
- [45] Qt. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Qt>>. Acesso em 5 de maio de 2008.
- [46] XML. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/XML>>. Acesso em 5 de maio de 2008.
- [47] PIL: Python Imaging Library. Disponível em: <<http://pythonware.com/products/pil/>>. Acesso em 18 de maio de 2008.
- [48] NumPy. Disponível em: <<http://numpy.scipy.org/>>. Acesso em 18 de maio de 2008.
- [49] Espaço de Cores Disponíveis. Disponível em: <[http://docs.kde.org/kde3/pt\\_BR/koffice/krita/colorspaces-list.html](http://docs.kde.org/kde3/pt_BR/koffice/krita/colorspaces-list.html)>. Acesso em 18 de maio de 2008.
- [50] Espaços de Cor. Disponível em: <<http://w3.impa.br/~lvelho/ip02/demos/apneto/hp/cor.htm>>. Acesso em 18 de maio de 2008.
- [51] LUNDH, F. *Histogram Equalization*. Disponível em: <<http://effbot.org/zone/pil-histogram-equalization.htm>>. Acesso em 19 de maio de 2008.

# Apêndice A

## Avaliação das Ferramentas de Testes e Correção

Apresentamos aqui o formulário utilizado na avaliação dos resultados da Ferramenta de Correção.

### FORMULÁRIO DE AVALIAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE TESTE E CORREÇÃO

#### Dados

Nome:					Teste n°:		
Idade:		Sexo:	F	<input type="checkbox"/>	M	<input type="checkbox"/>	Data: / /

#### Resultado do Teste de Daltonismo

Daltonismo:		%
Protan:		%
Deutan:		%
Normalidade:		%

#### Correção 01: Modelo de Cor RGB com Equalização de Histograma

Imagem	Muito Pior	Pior	Igual	Melhor	Muito Melhor
01					
02					
03					
04					
05					
06					
07					
08					
09					
10					
<b>Total:</b>					



**Correção 02: Modelo de Cor RGB sem Equalização de Histograma**

<b>Imagem</b>	<b>Muito Pior</b>	<b>Pior</b>	<b>Igual</b>	<b>Melhor</b>	<b>Muito Melhor</b>
01					
02					
03					
04					
05					
06					
07					
08					
09					
10					
<b>Total:</b>					

**Correção 03: Modelo de Cor LMS com Equalização de Histograma**

<b>Imagem</b>	<b>Muito Pior</b>	<b>Pior</b>	<b>Igual</b>	<b>Melhor</b>	<b>Muito Melhor</b>
01					
02					
03					
04					
05					
06					
07					
08					
09					
10					
<b>Total:</b>					

**Correção 04: Modelo de Cor LMS sem Equalização de Histograma**

<b>Imagem</b>	<b>Muito Pior</b>	<b>Pior</b>	<b>Igual</b>	<b>Melhor</b>	<b>Muito Melhor</b>
01					
02					
03					
04					
05					
06					
07					
08					
09					
10					
<b>Total:</b>					

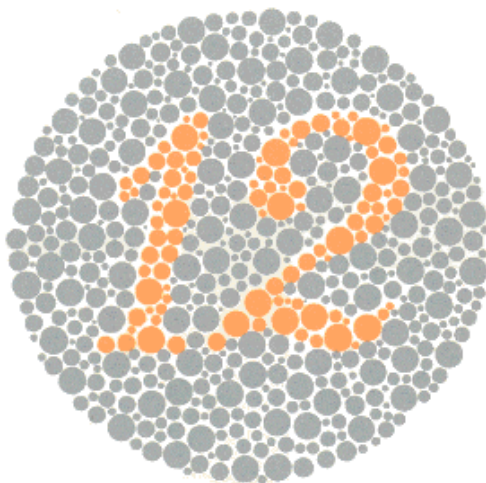
# Anexo A

## Pranchas de Ishihara

Pranchas pseudoisocromáticas do teste de Ishihara, utilizadas na ferramenta DaltonTest.

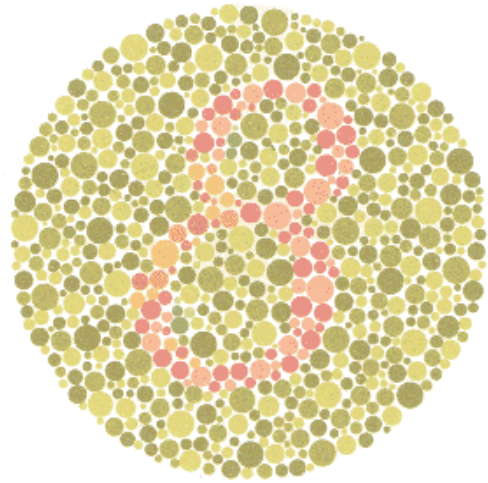
Nº

01

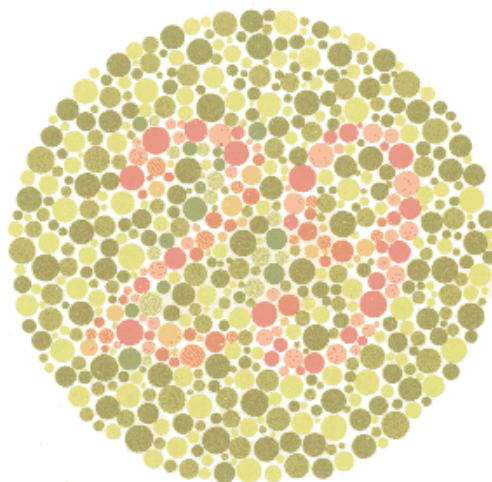


Nº

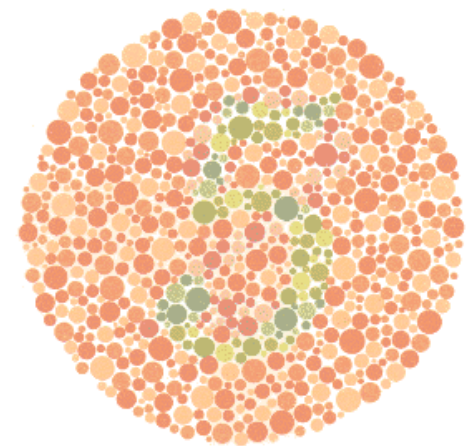
02



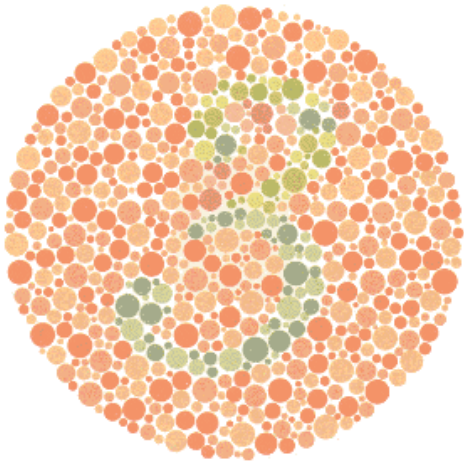
03



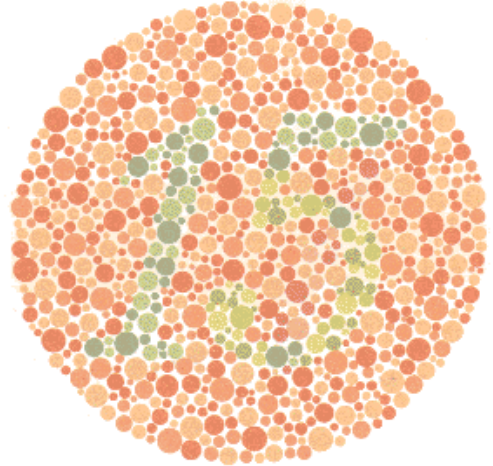
04



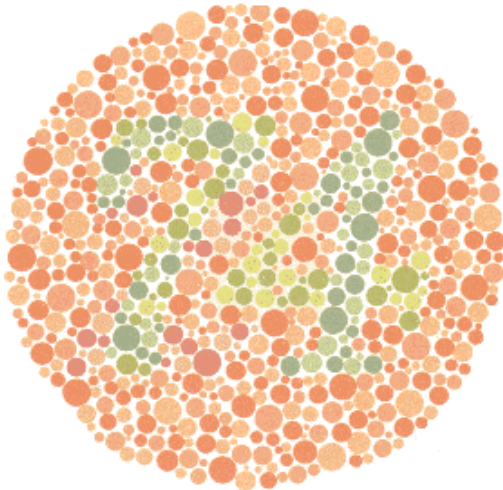
05



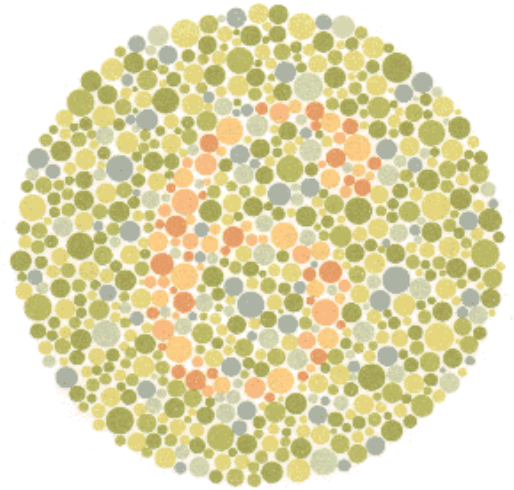
06



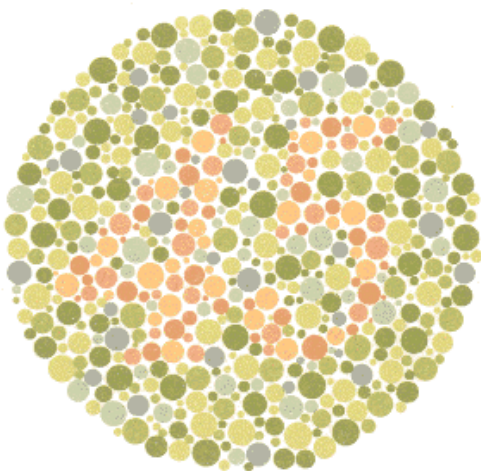
07



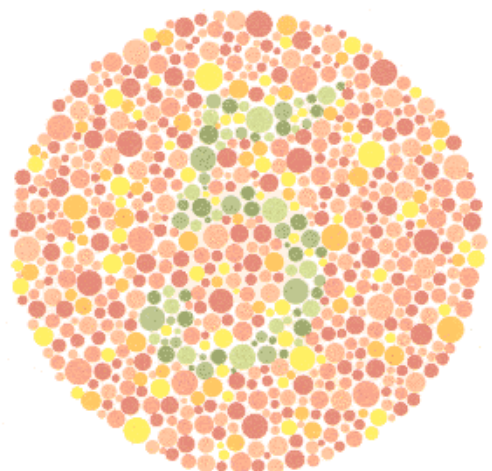
08



09

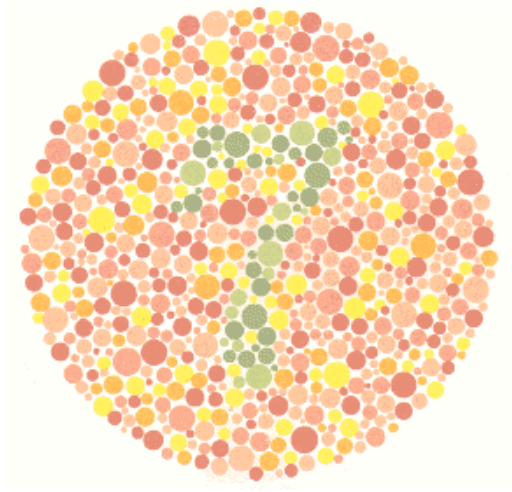


10

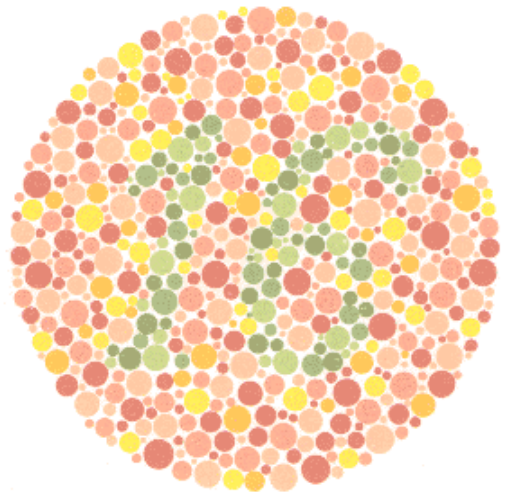




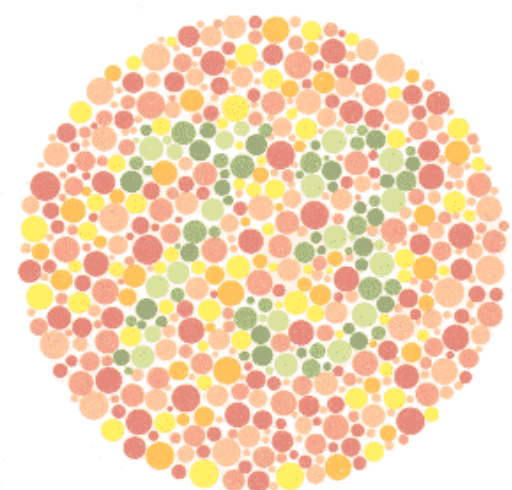
11



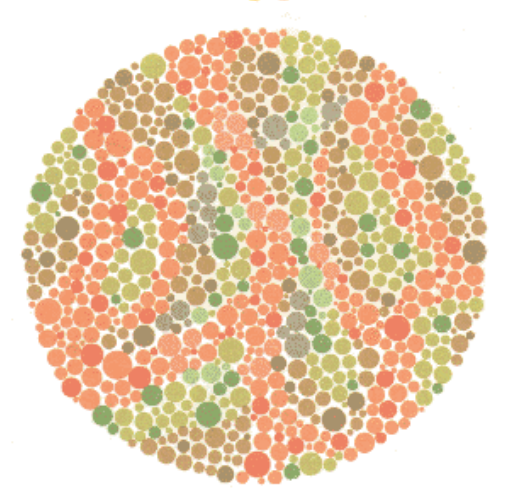
12



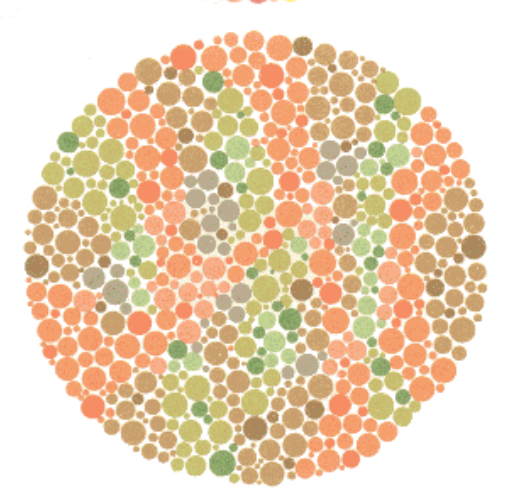
13



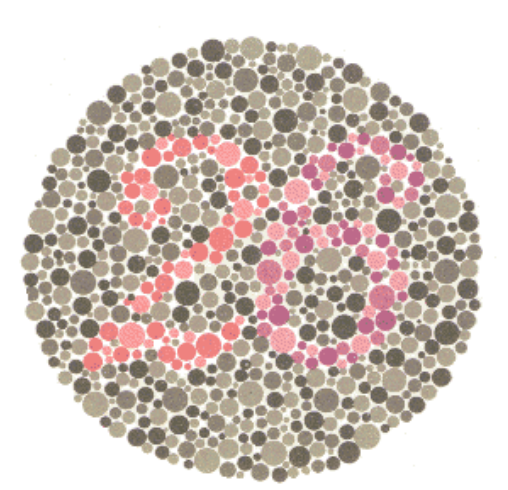
14



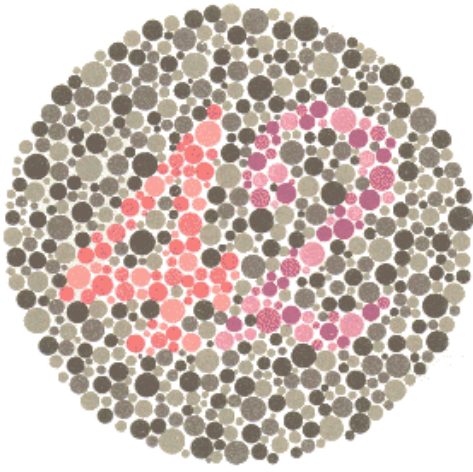
15



16

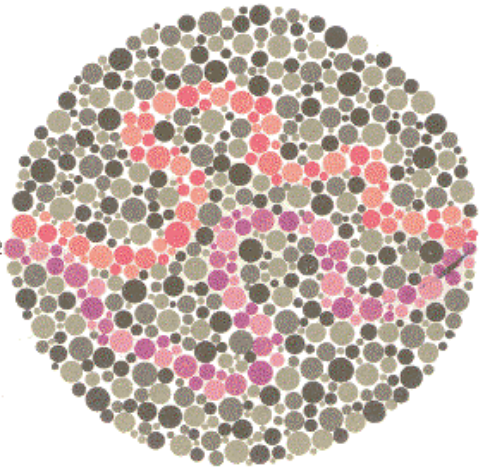


17



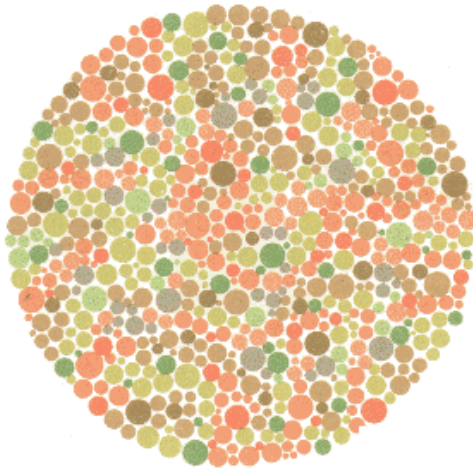
18

X1  
X2



19

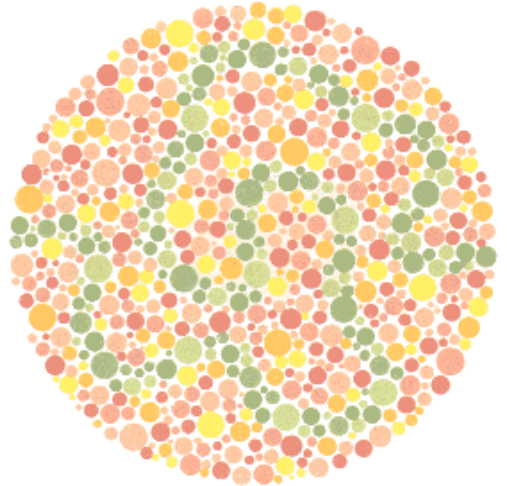
X



X

20

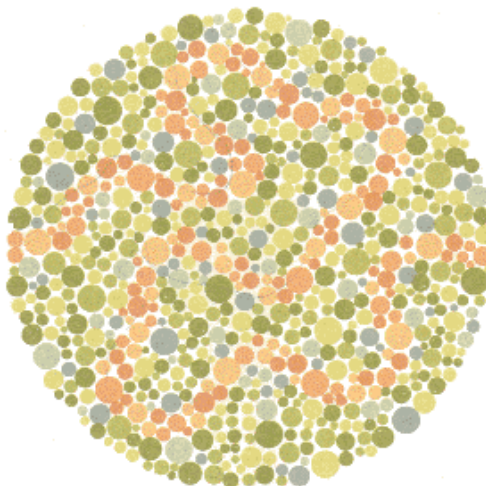
X



X

21

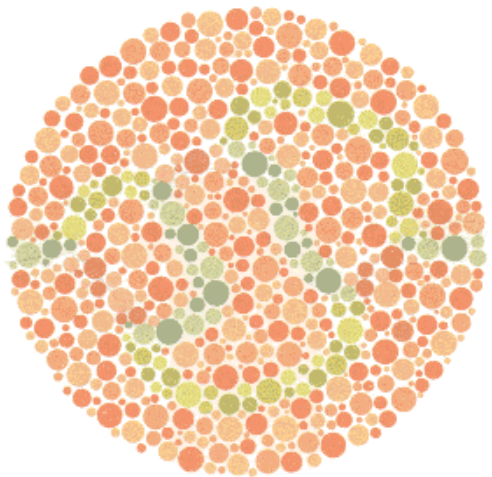
X



X

22

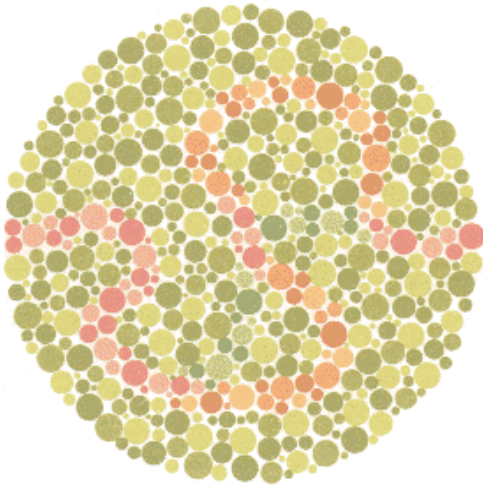
X



X



23



24

