

3

Colorimetria

3.1. Conceitos Básicos de Colorimetria

Para entender as técnicas de processamento de imagens em imagens coloridas, é importante compreender como a informação de cor é integrada em imagens digitais. Colorimetria é parte da ciência das cores com o propósito de especificar numericamente a cor de um determinado estímulo visual. A colorimetria também se preocupa em especificar pequenas diferenças de cor que um observador pode perceber [WYSZECKI, 1982].

A noção de cor está fortemente relacionada com o sistema visual humano. A ciência das cores tem como propósito o estudo de como os seres humanos percebem as cores. Entretanto para que esse estudo seja completo, outras áreas devem ser pesquisadas, tais como física, fontes de luz, ótica, propriedades refletivas da matéria, a estrutura do olho, como ele trabalha e como a informação é percebida e analisada pelo cérebro. Como o objetivo deste trabalho é utilizar a informação de cor para auxiliar e melhorar as técnicas de processamento de imagens, será adotado um direcionamento mais quantitativo no que se refere às informações de cores.

Os estudos atuais da colorimetria afirmam que em condições de observação, um estímulo de cor pode ser obtido através de misturas aditivas de três estímulos fixados cujas energias radiantes devem ser satisfatoriamente ajustadas [WYSZECKI, 1982]. Isso em colorimetria, é chamado generalização tri-cromática. Uma fonte de energia radiante pode ser

caracterizada por sua distribuição espectral de energia radiante (DEER), que na verdade é a soma das diferentes quantidades de comprimento de onda do espectro que formam o estímulo em questão. A energia total emitida por uma fonte radiante que caracteriza o estímulo é dada pela integral da distribuição de energia espectral conforme mostra a Eq.3.1 [PRATT, 1991], e o gráfico representando um determinado estímulo pode ser observado na Figura 3.1.

$$P = \int_0^{\infty} Q(\lambda) d\lambda \quad (3.1)$$

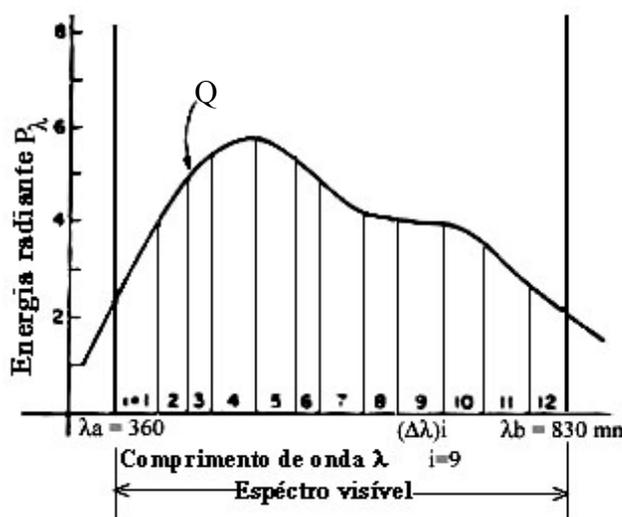


Figura 3.1 – Exemplo da distribuição espectral de energia radiante $\{P_\lambda d\lambda\}_Q$ de um estímulo de cor **Q**. O espectro visível está fechado no intervalo de $\lambda_a = 360$ a $\lambda_b = 830$ nm. Está subdividido em 12 intervalos com larguras diferentes $(\Delta\lambda)_i$ [WYSZECKI, 1982].

3.2. Igualdade de Cores – "Color Matching"

A base da teoria tri-cromática da visão a cores diz que é possível igualar a cor de um determinado estímulo arbitrário através da mistura aditiva de três cores, ou estímulos primários [PRATT, 1991], [WYSZECKI, 1982]. Por mistura aditiva subentende-se um estímulo de cor no qual a energia radiante em qualquer intervalo de comprimento de onda, em qualquer parte do espectro, é igual a soma das energias no mesmo intervalo das misturas constituintes [WYSZECKI, 1982]. Observando a Figura 3.1, é mais

fácil compreender esse princípio. Essas misturas constituintes são representadas pelas cores vermelho (*red*) ($\lambda_R=700\text{nm}$), verde (*green*) ($\lambda_G=546,1\text{ nm}$) e azul (*blue*) ($\lambda_B=435,8\text{ nm}$) e são usadas principalmente em televisão a cores onde o sinal é projetado em uma superfície com propriedades ideais de reflexão difusa [PRATT, 1991]. Sistemas de cores subtrativas possuem constituintes diferentes que são usualmente as cores secundárias ciano (verde e azul), magenta (vermelho e azul) e amarelo (vermelho e verde), usadas na grande maioria dos sistemas de fotografia e impressão, [PRATT, 1991]. Nas aplicações desenvolvidas neste trabalho, entretanto, será utilizado o modelo aditivo e, os três estímulos primários, estarão baseados nas cores vermelho, verde e azul. O uso dessas primárias deve-se ao processo de aquisição das imagens que foi feito com uma câmera CCD (Coupled Charge Device) que captura as imagens nesse formato. Essas imagens foram em seguida digitalizadas por uma placa de captura de vídeo que armazena as imagens também no formato RGB.

3.3. Comparação Aditiva de Cores

Uma luz de cor [C] com distribuição espectral de energia arbitrária $C(\lambda)$, é projetada em uma superfície difusa ideal. Uma luz branca de referência [W] com distribuição de energia igual a da Figura 3.2 é projetada na superfície junto com três luzes primárias [P1], [P2] e [P3], cujas distribuições espectrais de energia são visualizadas nas Figuras 3.2 a, b e c. As três luzes primárias são sobrepostas e suas intensidades ajustadas até que a região sobreposta iguale perceptivamente com o branco de referência em termos de brilho, cromaticidade e saturação. Em seguida a intensidade das primárias é ajustada até que uma igualdade seja alcançada em relação à luz colorida [C]. A intensidade das primárias $A1[C]$, $A2[C]$ e $A3[C]$, são gravadas quando a igualdade é obtida, e valores normalizados, $T1[C]$, $T2[C]$ e $T3[C]$, chamados valores de tri-estímulo, são computados [PRATT, 1991] de acordo com a equação 3.2.

$$T_1 [C] = \frac{A_1(C)}{A_1(W)} \quad T_2 [C] = \frac{A_2(C)}{A_2(W)} \quad T_3 [C] = \frac{A_3(C)}{A_3(W)} \quad (3.2)$$

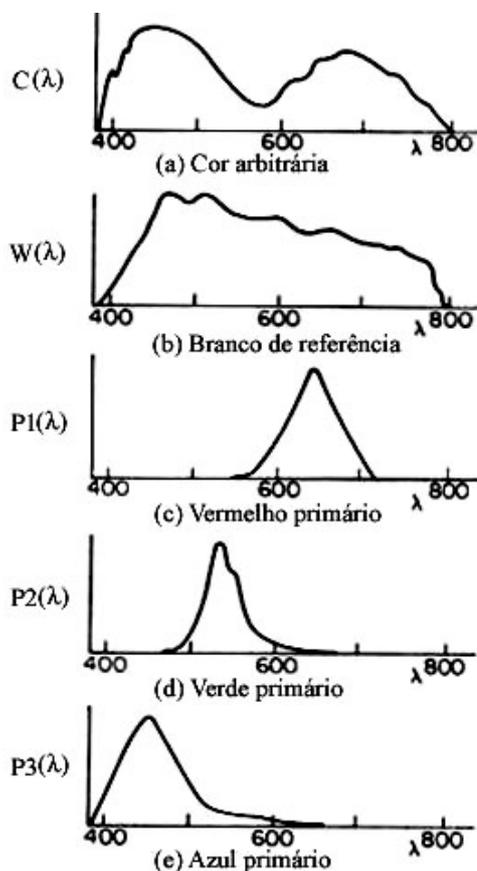


Figura 3.2 – Distribuições espectrais de energia

Se os resultados da comparação de cores obedecem a uma certa linearidade, uma formulação mais quantitativa da generalização tri-cromática é obtida. A essas leis lineares de proporção e adição pode-se adicionar as leis de simetria e transitividade [WYSZECKI, 1982].

1. Lei de simetria

Se um estímulo de cor **A** é igual a um estímulo de cor **B**, então o estímulo de cor **B** é igual ao estímulo **A**.

2. *Lei da transitividade*

Se **A** é igual a **B** e **B** é igual a **C**, então **A** é igual a **C**.

3. *Lei da proporcionalidade*

Se **A** é igual a **B**, então $\alpha\mathbf{A}$ é igual a $\alpha\mathbf{B}$, onde α é qualquer fator positivo no qual a energia radiante do estímulo de cor é aumentada ou diminuída, enquanto sua distribuição espectral se mantém a mesma.

4. *Lei da adição*

Se **A**, **B**, **C**, **D** são quatro estímulos de cor quaisquer, então se qualquer conjunto de duas das três igualdades de cor seguintes

A é igual a **B**, **C** é igual a **D**, e **(A+C)** é igual a **(B+D)**

for satisfeito, a proposição seguinte também será

(A+D) é igual a **(B+C)**

onde **(A+C)**, **(B+D)**, **(A+D)**, **(B+C)** denotam, respectivamente, misturas aditivas de **A** e **C**, **B** e **D**, **A** e **D**, e **B** e **C**.

Essas sentenças de comparação de cores formuladas, são afirmações concisas do que está implícito nas três leis de mistura de cores aditivas de Grassman. Diferentes formulações das leis de Grassman podem ser encontradas na literatura [PRATT, 1991].

Os experimentos de comparação de cores descritos tem sido desenvolvidos com muita precisão por vários pesquisadores. Foi observado que uma igualdade perfeita de cores não pode ser obtida. Vários fatores podem influenciar nos resultados das comparações de cores, tais como: condições de observação as quais é submetido o observador, os possíveis efeitos de diferentes exposições anteriores do olho à luz, diferenças obtidas de diferentes observadores [WYSZECKI, 1982]. Estes e outros fatores de observação podem ser encontrados com mais detalhes em [WYSZECKI, 1982].

3.4. Espaço de Três Estímulos

No espaço de três estímulos, uma determinada cor \mathbf{Q} é produzida através da projeção na retina de uma superfície emitindo energia radiante uniforme. Desse modo, um estímulo de cor será definido unicamente por sua distribuição espectral de energia radiante $\{P\lambda d\lambda\}$ [WYSZECKI, 1982]. Por essa definição, uma comparação de cores entre um determinado estímulo \mathbf{Q} e uma mistura aditiva com quantidades satisfatórias das três primárias \mathbf{R} , \mathbf{G} , \mathbf{B} , pode ser expressa pela Equação 3.3.

$$\mathbf{Q} = R_Q\mathbf{R} + G_Q\mathbf{G} + B_Q\mathbf{B} \quad (3.3)$$

onde os multiplicadores escalares R_Q , G_Q e B_Q medidos em termos de atribuição a cada estímulo primário \mathbf{R} , \mathbf{G} , \mathbf{B} , são chamados valores tri-estímulos de \mathbf{Q} . Entretanto, a Equação 3.3 só se aplica se o estímulo \mathbf{Q} pode ser igualado pela mistura dos três estímulos primários em quantidades positivas ou nulas [WYSZECKI, 1982].

Uma representação bidimensional é comumente preferida, entretanto é reconhecido que essa forma de representação reduz a quantidade de informação contida no vetor de três estímulos do estímulo. Uma forma muito

utilizada de representação é obtida no plano unitário $R+G+B = 1$. Todos os vetores de três estímulos, como Q , devem interceptar o plano unitário em um ponto Q (Figura 3.3). As coordenadas de cromaticidade são dadas pela Equação 3.4.

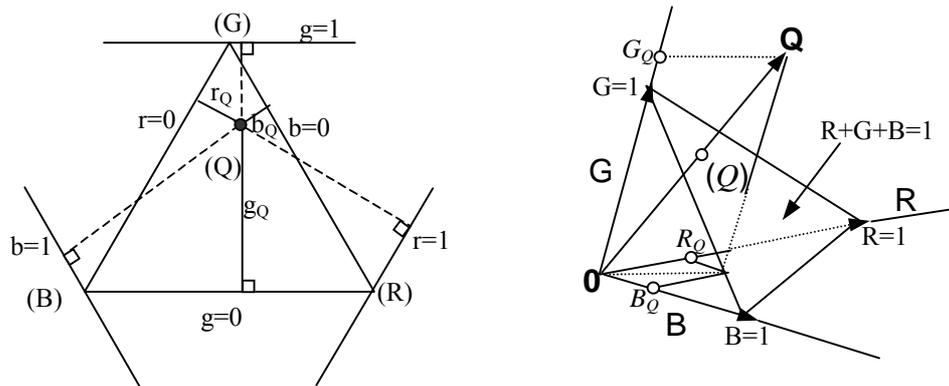


Figura 3.3 – Espaço de três estímulos **RGB** e diagrama de cromaticidade.

$$\begin{cases} r = \frac{R}{R+G+B} \\ g = \frac{G}{R+G+B} \\ b = \frac{B}{R+G+B} \end{cases} \quad (3.4)$$

onde $r + g + b = 1$

O diagrama mostrado na Figura 3.3 está na forma de um triângulo, usado no início da prática da colorimetria, o qual é muitas vezes referido como "triângulo colorido de *Maxwell*". Uma versão mais conveniente é um triângulo onde os eixos das coordenadas r e g são perpendiculares, tal como mostra a Figura 3.4. Entretanto tais operações não alteram as equações de coordenadas cromáticas definidas até aqui.

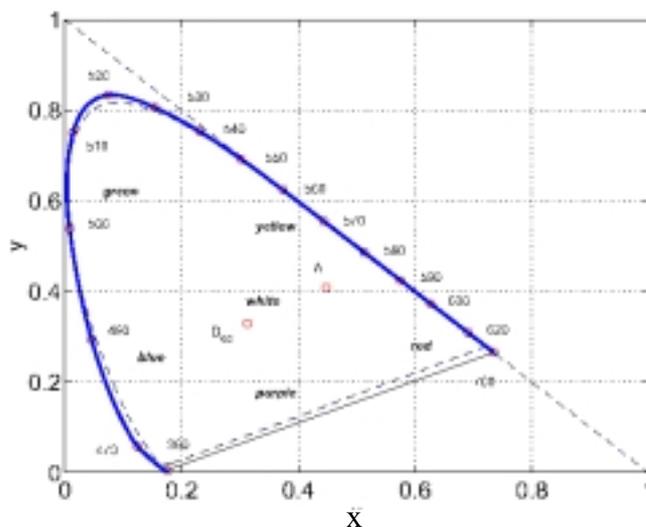


Figura 3.4 – Diagrama de crominância do padrão CIE de 1931 [SCHMID,1999]

Como foi citado anteriormente, um determinado estímulo \mathbf{Q} pode ser definido por sua distribuição espectral de energia radiante $\{P\lambda d\lambda\}_Q$, a qual pode ser imaginada como uma mistura aditiva de um conjunto de estímulos Q_i , com distribuições de energia espectral $\{P\lambda d\lambda\}_{Q_i}$ confinadas em n intervalos de comprimento de onda de largura $\Delta\lambda$, sendo que i varia de 1 até n . Os n intervalos subdividem completamente o espectro de luz visível. A Figura 3.1 ilustra um caso onde o espectro é dividido em $n=12$ partes de larguras $\Delta\lambda_i$ diferentes.

A quantidade $\{P\lambda d\lambda\}$ representa a energia radiante no intervalo de comprimento de onda de largura $d\lambda$, centrado no comprimento de onda λ , que se define como *estímulo monocromático de comprimento de onda λ* , indicado por $\mathbf{Q}\lambda$ ($\mathbf{Q}\lambda = \{P\lambda d\lambda\}$)[WYSZECKI, 1982].

Um importante conjunto de valores de três estímulos espectrais é obtido quando todos os estímulos monocromáticos $\mathbf{Q}\lambda$, contidos no espectro de uma determinada cor \mathbf{Q} , possuem energia radiante unitária em qualquer comprimento de onda do espectro visível. Tal estímulo é chamado de

"estímulo de igual energia" [WYSZECKI, 1982], e é denotado por E . Os constituintes monocromáticos de $E\lambda$ obedecem a Equação 3.5.

$$E\lambda = \bar{r}(\lambda)R + \bar{g}(\lambda)G + \bar{b}(\lambda)B \quad (3.5)$$

3.5. Sistema Colorimétrico CIE

Na prática colorimétrica, o principal objetivo é obter resultados válidos para um grupo de observação tricromática normal. Para essa finalidade, as propriedades de igualdade de cores de um observador tricromático ideal são definidas especificando-se três funções independentes de comprimento de onda que são identificadas como "*funções de comparação de cores ideais para o observador*". Os valores dessas funções ideais de observação, como funções de comprimento de onda, são fixados de forma que os resultados de determinadas equações representem a comparação de cores de um observador normal ou da média de um grupo de observadores [WYSZECKI, 1982]. Elas foram obtidas indiretamente em experimentos de comparação de cores feitos por uma série de observadores [PRATT, 1991].

Por um consenso geral, em todos os países as especificações de padrões de observação para uso em colorimetria e fotometria são providas pelo **CIE** (*Commission Internationale de l'Eclairage* – Comissão Internacional de Iluminação). A CIE é uma organização autônoma, não designada por qualquer órgão político, que desde o princípio tem sido aceita como a maior autoridade no que se refere à iluminação e é reconhecida pela ISO como um corpo internacional de padronização.

As Figuras 3.5 e 3.6 mostram as funções de comparação de cores e os diagramas cromáticos para dois sistemas diferentes baseados nos padrões de 1931 e 1964 da CIE. As funções de cores e as coordenadas de cromaticidade correspondentes incluem valores negativos, os quais são inconvenientes na

prática. Por esta razão a CIE adotou uma transformação no sistema tricromático baseado nos estímulos primários **R**, **G**, **B** para um novo sistema de estímulos primários. O sistema *XYZ* foi escolhido de forma que o estímulo *Y* fosse equivalente à luminância da cor a ser igualada. Os estímulos primários **X**, **Y**, **Z** são imaginários, isto é, eles não podem ser percebidos por estímulos de cor atuais. Isso porque, no espaço de três estímulos, eles são representados por vetores que saem do domínio dos vetores representando estímulos reais [WYSZECKI, 1982].

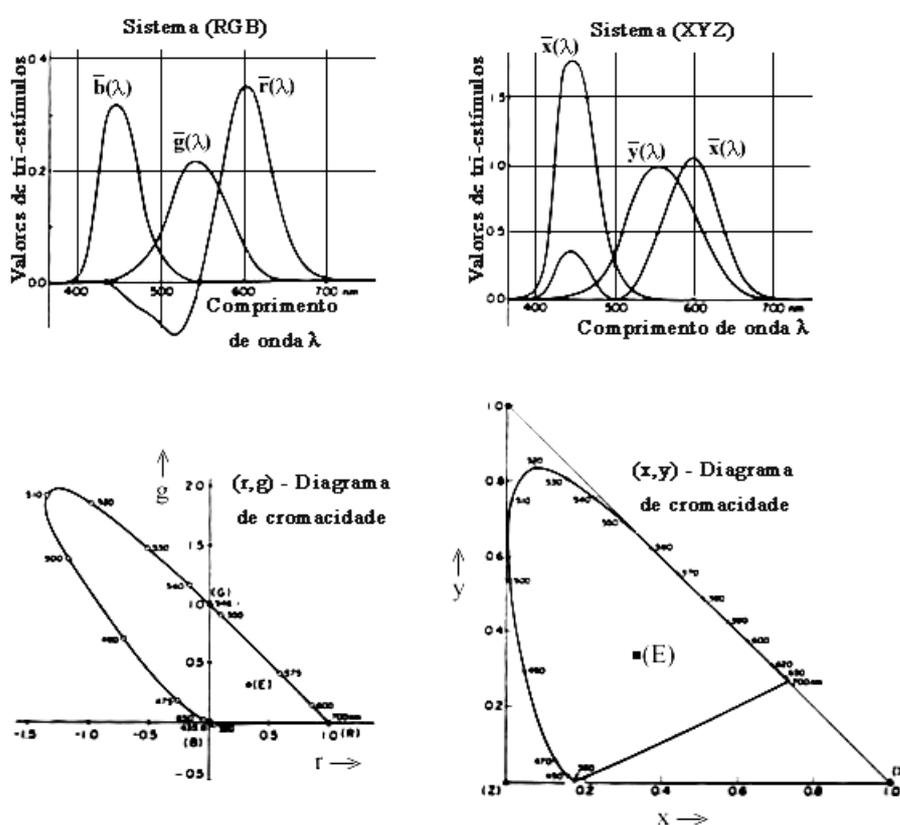


Figura 3.5 - Funções de comparação de cores e diagramas cromáticos correspondentes do padrão colorimétrico CIE de 1931 nos sistemas primários real, **RGB** e imaginário **XYZ** [WYSZECKI, 1982].

A relação entre os valores *RGB* e *XYZ* é dada pela seguinte equação linear:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.7690 & 1.7518 & 1.1300 \\ 1.0000 & 4.5907 & 0.0601 \\ 0.0000 & 0.0565 & 5.5943 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

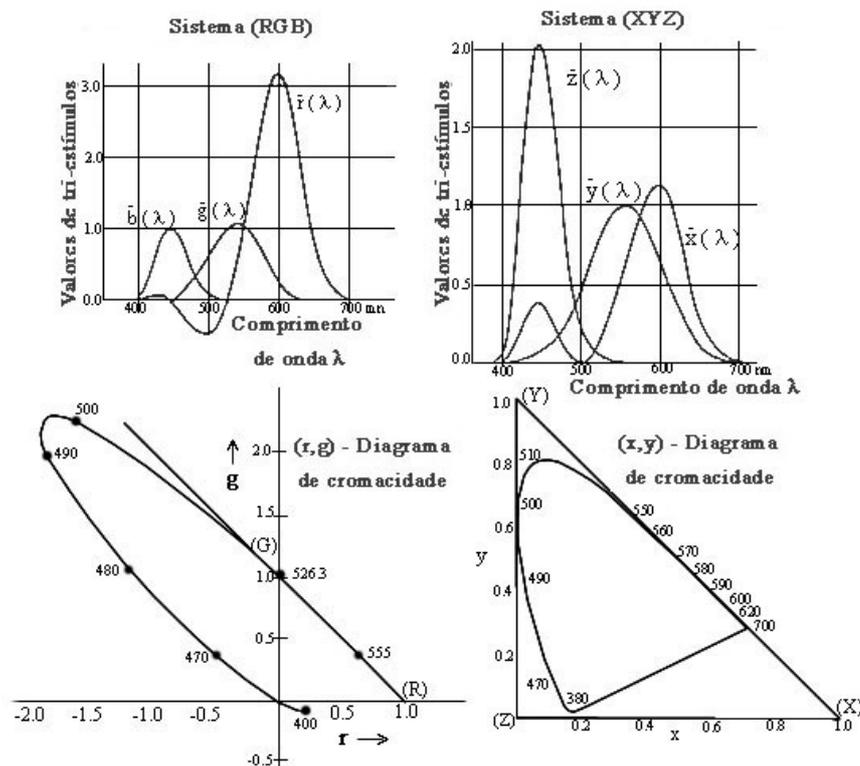


Figura 3.6 - Funções de comparação de cores e diagramas cromáticos correspondentes do padrão colorimétrico suplementar de CIE de 1964 nos sistemas primários real, **RGB** e imaginário **XYZ** [WYSZECKI, 1982].

Nas Figuras 3.5 e 3.6 podem ser observadas as funções de comparação de cores após a transformação para os estímulos primários *XYZ* além dos diagramas cromáticos correspondentes. As unidades dos estímulos primários reais e imaginários foram escolhidas de forma que o ponto *E* do estímulo de igual energia **E** se localize no centro do diagrama cromático (*r-g*), de forma que $r=g=1/3$.

3.6. Modelos de Cores

Devido ao entendimento limitado do sistema visual humano, vários modelos de cores tem sido propostos para modelar as características de uma cor. Todos esses modelos são baseados em pelo menos três componentes para descrever uma cor, similar ao *XYZ* utilizado para descrever cores no diagrama cromático da CIE.

Para muitas aplicações que utilizam imagens coloridas, a representação *RGB* muitas vezes gera resultados parcialmente bons. A razão disso usualmente é a não uniformidade desse espaço de cores e não existência de uma separação entre luminância e cromaticância [SCHMID,1999]. Dependendo do tipo de aplicação torna-se necessário o uso de diferentes representações de cores.

Neste projeto a cor é de extrema importância, já que é a principal característica a ser extraída das imagens de úlceras. Por isto, diferentes espaços de cores serão utilizados em conjunto para se obter um bom poder discriminante entre as características intrínsecas.

Vários sistemas de espaços de cores tem sido empregados para a especificação de uma cor. Dentre eles, destacaremos os mais relevantes e de uso prático neste trabalho. Na Tabela 1 podem ser consultados vários métodos de conversão do espaço *RGB* para outras representações de cores.

$R_N G_N B_N$	$\begin{bmatrix} R_N \\ G_N \\ B_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.910 & -0.532 & -0.288 \\ -0.985 & 2.000 & -0.028 \\ 0.058 & -0.118 & 0.898 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$
YIQ	$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.000 & 1.000 & 0.000 \\ 1.407 & -0.842 & -0.451 \\ 0.932 & 1.189 & 0.233 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$
YUV	$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.000 & 1.000 & 0.000 \\ 1.688 & -0.058 & -0.251 \\ 0.015 & 1.456 & 0.441 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$
UVW	$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.667 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 1.000 & 0.000 \\ -0.500 & 1.500 & 0.500 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$

Tabela 3.1 – Fórmulas de conversão entre espaços de cores

Os espaços de cores da Tabela 1 foram basicamente propostos para uso do padrão *NTSC* (*National Television Systems Committee* - Comitê Nacional de Sistemas de Televisão). Por não terem uma aplicação prática neste trabalho, apenas citaremos as conversões de *RGB* para esses padrões. Mais detalhes podem ser encontrados na literatura [PRATT, 1991], [WEEKS, 1996], [RUSS,1994].

3.6.1. Modelo de Cores RGB

Esse modelo usa as três cores primárias do padrão *NTSC* para descrever uma cor em uma imagem colorida. Cada componente de cor representa um eixo ortogonal em um espaço euclidiano tridimensional como mostra a Figura 3.7. O modelo de cores *RGB* é um espaço de cores normalizado e é definido por seus componentes de cores

$$\mathbf{r} = \mathbf{R} / \mathbf{R}_{\max}, \mathbf{g} = \mathbf{G} / \mathbf{G}_{\max} \text{ e } \mathbf{b} = \mathbf{B} / \mathbf{B}_{\max} \quad (3.7)$$

onde R_{\max} , G_{\max} e B_{\max} são as intensidades máximas de cores para cada componente de cor correspondente; e r , g , b são os componentes RGB normalizados em valores de 0 a 1. Esse modelo, portanto, trata uma imagem colorida como um conjunto de três imagens independentes em tons de cinza, cada uma das quais representando as cores vermelho, verde e azul.

Seis dos oito cantos do cubo da Figura 3.7 descrevem as três cores primárias vermelho, verde e azul e as três cores secundárias amarelo, magenta e ciano. Os dois cantos adicionais representam as cores branco e preto. A linha pontilhada da Figura 3.7 corresponde a todas as combinações de valores iguais dos três componentes de cor, o que resulta nos possíveis níveis de cinza que uma imagem digital pode conter neste padrão [WEEKS, 1996].

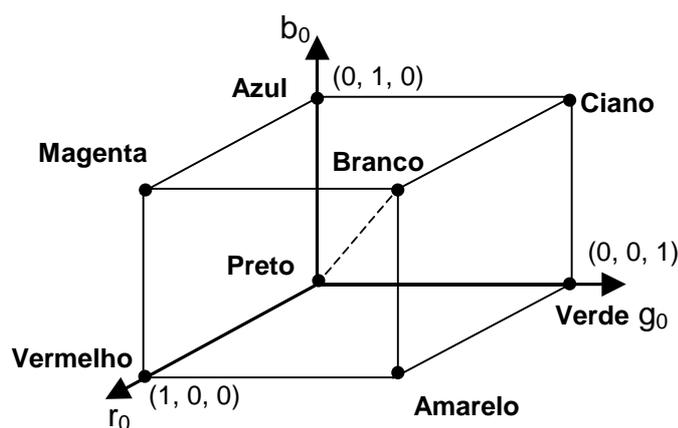


Figura 3.7 – Cubo do modelo de cores **RGB** [WEEKS, 1996]

A dificuldade com o modelo RGB é que ele não produz componentes de cor que refletem com fidelidade o sistema visual humano. Um outro modelo de cores que produz componentes que melhor representam o entendimento das cores é o composto pelos componentes "*hue*", "*saturation*" e "*intensity*" (matiz, saturação e intensidade).

3.6.2. Modelo de Cores HSI

Existem vários modelos de cor que são utilizados para representar os componentes de matiz e saturação de uma imagem colorida. O modelo exposto aqui é o HSI, que é baseado no triângulo de Maxwell, derivado do cubo de cores *RGB*. A Figura 3.8 ilustra o triângulo *HSI* como um plano que intercepta as coordenadas *r*, *g* e *b*. O modelo *HSI* transforma o cubo tridimensional *RGB* em um triângulo bidimensional separando o componente luminosidade da cromaticidade. No centro do triângulo há uma linha conectando as cores branca e preta. Como essa linha corresponde a todos os níveis de cinza possíveis de uma cor, o centro do triângulo *HSI* corresponde as cores com nível de saturação zero. Localizadas nos vértices do triângulo encontram-se as três cores primárias. O componente de saturação *S* é medido em termos do comprimento do vetor partindo do centro do triângulo até uma determinada cor *r*, *g*, *b*, sendo que as bordas do triângulo equivalem a 100% de saturação. A matiz θ é definida como um ângulo entre 0° e 360° e é medida tendo como referência uma linha traçada do centro do triângulo até o vértice da cor vermelha correspondente a 0° .

Para transformar os componentes de cor *RGB* para *HSI* e o inverso, é necessário que o componente *H* seja dividido em três regiões. Quando o componente azul *b* é o mínimo dos três, a cor encontra-se localizada na região da base do triângulo e o ângulo da matiz está entre 0° e 120° . Da mesma forma quando o componente vermelho *r* é o mínimo, a cor está localizada do lado direito do triângulo e o ângulo da matiz está entre 120° e 240° . Finalmente, quando o componente verde *g* é o mínimo, a cor se encontra do lado esquerdo do triângulo e o ângulo da matiz entre 240° e 360° . Os três componentes de cor *RGB* são normalizados para os componentes *r*, *g* e *b* através da equação 3.8.

$$\begin{cases} r = R / R + G + B \\ g = G / R + G + B \\ b = B / R + G + B \end{cases} \quad (3.8)$$

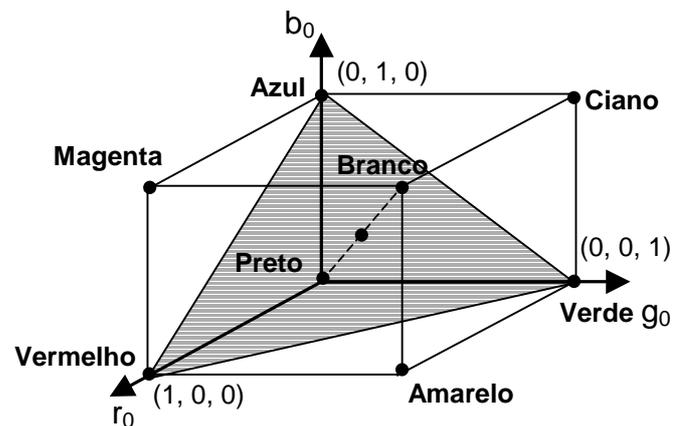


Figura 3.8 – O triângulo **HSI** particionando o cubo **RGB** [WEEKS, 1996]

Os componentes de intensidade, saturação e matiz, em termos de componentes *RGB* são definidos pelas equações 3.9, 3.10 e 3.11.

$$I = R + G + B / 3 \quad (3.9)$$

$$S = 1 - 3 \cdot \min[r,g,b] \quad (3.10)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{\frac{2}{3} \left(r - \frac{1}{3} \right) - \frac{1}{3} \left(g - \frac{1}{3} \right) - \frac{1}{3} \left(b - \frac{1}{3} \right)}{\sqrt{\left(\frac{2}{3} \right) \left[\left(r - \frac{1}{3} \right)^2 + \left(b - \frac{1}{3} \right)^2 + \left(g - \frac{1}{3} \right)^2 \right]}} \right] \quad (3.11)$$

Sempre que $b > g$, a matiz θ será maior que 180° . Neste caso, como o coseno inverso é definido dentro do intervalo de 0° a 180° , θ é substituído por $360^\circ - \theta$. Três imagens em níveis de cinza representando matiz, saturação

e intensidade podem ser geradas lendo pixel a pixel da imagem *RGB* original e calculando esses valores através das Equações 3.9, 3.10 e 3.11 [WEEKS, 1996].

Uma das limitações do modelo *HSI* é que ele considera cada componente *RGB* por igual na hora de calcular a intensidade, ou luminosidade de uma imagem. A sensibilidade do olho varia para cada componente do modelo *RGB*. Sendo assim um melhor mapeamento para a intensidade pode ser obtido através da transformação

$$\mathbf{Y} = 0.299\mathbf{R} + 0.587\mathbf{G} + 0.114\mathbf{B} \quad (3.12)$$

A Equação 3.12 provê uma correspondência melhor com a percepção de brilho de uma cor. O \mathbf{Y} pode substituir o componente \mathbf{I} do modelo \mathbf{HSI} [WEEKS, 1996].