

5. A COR NO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO

5.1 Introdução

A capacidade do sistema visual humano em discernir tonalidades de cinza não vai além de 30 diferentes níveis. Quando se trata porém de discernir cores, esse número pula facilmente para algumas dezenas de milhares de cores diferentes (com um máximo supostamente em torno de 7 milhões). Pode-se portanto dizer que a cor domina o sistema visual humano.

Em processamento digital de imagens de sensoriamento remoto, as quais por sua natureza multi-espectral são compostas por diversas bandas, composições a cores de conjuntos de três bandas (tripletes) constituem-se numa poderosa forma de sintetizar, numa única imagem, uma grande quantidade de informação, ao mesmo tempo em que representam essa informação em diferentes cores, facilitando portanto sua interpretação. As composições coloridas são por isso um dos produtos mais comuns do processamento digital de imagens de S.R.. Para se fazer um uso mais otimizado dessa ferramenta, é necessário entender um pouco dos fundamentos básicos da Teoria de Cores e algum de seus modelos, tratados a seguir.

Antes de apresentar esses fundamentos básicos, alguns aspectos sobre percepção em imagens devem ser considerados. Um intérprete experiente de imagens de S.R. utiliza-se geralmente de três propriedades básicas das superfícies representadas nas imagens, para interpretá-las. São elas: **tonalidade**, **textura** e **contexto**. **Tonalidade** refere-se então à cor ou ao brilho dos objetos que compõem a cena; os tons estão relacionados às propriedades de reflectância dos materiais superficiais e depende da porção do espectro eletromagnético coberto pela(s) imagem(ns) considerada(s). **Textura** pode ser definida como uma combinação da magnitude e frequência da variação tonal em uma imagem, sendo produzida pelo efeito conjunto de todas as pequenas feições que compõem uma área em particular na imagem. Embora possam ser consideradas como propriedades independentes, tonalidade e textura na realidade possuem relações íntimas: sem variações em tonalidade, nenhuma mudança em textura poderia ser percebida. **Contexto**, por sua vez, se refere à como detalhes de tons, texturas e padrões (que são arranjos de tons e texturas) estão localizados em relação a atributos conhecidos do terreno; por exemplo, um vale em forma de "U" no deserto do Sahara provavelmente não foi formado por erosão glacial, mas sim como produto de erosão fluvial durante inundações súbitas.

Desse modo, atributos de textura são facilmente interpretados tanto em imagens

coloridas como em imagens monocromáticas. Por outro lado, é necessário ter cuidado ao se manipular as cores em imagens de S.R., pois um exagero das mesmas pode introduzir certa confusão visual ao intérprete e, conseqüentemente, prejudicar a percepção das mudanças texturais, que muitas vezes contém precisamente a informação desejada. A decisão a ser tomada antes de se fazer uma composição colorida baseia-se portanto na seguinte reflexão: a informação desejada é melhor expressa em cores, ou uma simples imagem monocromática bastaria?

Neste capítulo trataremos as imagens coloridas e de como elas podem ser realçadas para melhor visualização. Realce de informações texturais será o tema da próximo capítulo.

5.2 A Teoria Básica das Cores: o Espaço RGB

O trabalho de Thomas Young (1773-1829) revelou os princípios da teoria básica das cores. Ele descobriu que, projetando luz através de filtros vermelho, azul e verde no sentido de produzir círculos superpostos, diversos efeitos eram obtidos. Primeiramente, onde os três círculos coincidiam, luz branca era produzida. Uma vez que já se sabia nessa época que a luz branca era composta por um espectro contínuo de cores, esse fato era inesperado. Segundo, onde qualquer duas cores coincidiam, outras cores eram produzidas. Por exemplo, vermelho e azul produziam magenta e vermelho e verde produziam amarelo. Young também descobriu que, variando a quantidade relativa de vermelho, azul e verde na área de superposição, era possível produzir uma enorme gama de cores, incluindo diversos tons para cada uma. Outra observação de Young é que qualquer uma dessas 3 cores, vermelho, verde ou azul (**RGB**), não podiam ser produzidas com mistura de duas delas. Por isso, ele as chamou de **cores primárias aditivas**, uma vez seus efeitos resultavam da adição.

Um efeito complementar era obtido por Young ao subtrair vermelho, verde e azul da luz branca, usando filtros. A subtração de vermelho, por exemplo, produzia cyan, a de verde produzia magenta e a de azul produzia amarelo. Essas outras cores juntas, cyan, magenta e amarelo, por sua vez produziam preto. Magenta mais amarelo produzia vermelho, cyan e magenta produzia azul, amarelo e cyan produzia verde. Por isso, Young denominou essas três cores de **cores primárias subtrativas**.

Usando-se então as cores primárias ou secundárias, é possível se obter todas as tonalidades de cores. Os monitores de televisão, por exemplo, fazem uso das cores

primárias aditivas, ao passo que os processos de impressão litográfica colorida fazem uso das cores primárias subtrativas.

Usando esses princípios das cores primárias, é possível representar quantitativamente qualquer cor como um grupo de três números ou coeficientes. Os três coeficientes de cor podem ser plotados em um conjunto de eixos tridimensionais, onde cada eixo representa uma cor (RGB). Os três coeficientes vão definir o quanto de cada cor primária será necessária para produzir qualquer tonalidade. A figura 5.1 mostra graficamente o cubo RGB, no qual a quantidade de cada cor primária varia de 0 até um máximo. Matematicamente, uma cor qualquer C é dada por:

$$C = r.R + g.G + b.B$$

onde R,G,B são as três cores primárias e r,g,b são os coeficientes de mistura, os quais são geralmente limitados ao intervalo $0 \leq r,g,b \leq 1$. A cor C pode ser plotada no espaço de cores RGB usando-se os coeficientes de mistura (r,g,b) como coordenadas.

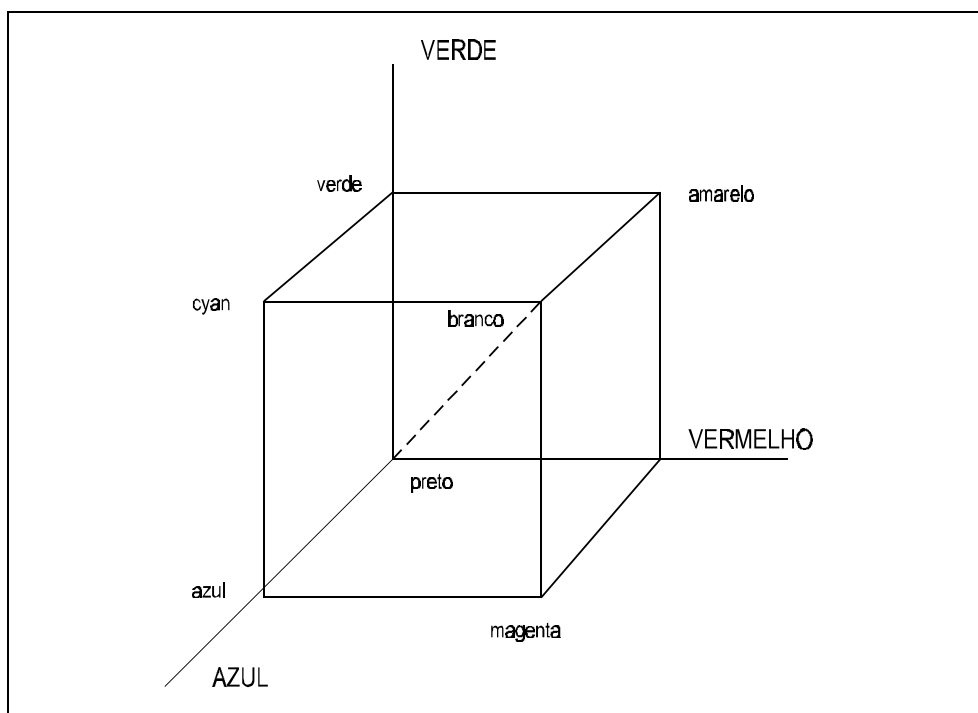


Figura 5.1 - Cubo RGB - os diferentes tons de cinza localizam-se ao longo da diagonal tracejada.

Os eixos do espaço de cores RGB são linhas de cores primárias puras, que aumentam em intensidade com a distância da origem. Notar que a origem representa a cor preta, estando o valor máximo desse sistema (representando portanto o branco), situado na sua diagonal. Se quantidades iguais das primárias são misturadas ($r=g=b$), diferentes tonalidades de cinza serão produzidas, cuja intensidade vai variar do preto ao branco. Portanto, a diagonal tracejada da Figura 5.1 representa o chamado **eixo cinza** (também chamado de **eixo acromático**), que é a linha onde os valores de r, g, b são proporcionalmente iguais. Nos três planos em que uma das cores primárias é igual a 0, estão representadas todas as cores que podem ser obtidas ao se misturar apenas duas primárias e, particularmente, as cores formadas por quantidades iguais delas (cyan, magenta e amarelo).

5.3 As cores e o sistema visual humano

Os monitores dos sistemas de processamento de imagens são, em muitos casos, capazes de representar cada uma das cores básicas com 256 tonalidades de cores, o que dá um total de mais de 16 milhões de tonalidades. Como já foi visto, o sistema visual não consegue ir além de alguns poucos milhões. Uma questão que se coloca então é: o quanto uma cor precisa mudar para que um intérprete perceba? Ou então: existem cores que são mais "visíveis" do que outras? As respostas a essas questões podem fornecer importantes "dicas" para se preparar composições coloridas de imagens de satélite.

O diagrama de cromaticidade define o espaço de cores de acordo com o comprimento de onda das cores primárias puras. Esse diagrama, mostrado na Figura 5.2, pode ser usado para plotar a sensibilidade do sistema visual a mudanças de cores. Ele foi elaborado a partir de experimentos com indivíduos e as áreas ovais representam áreas de "mesma cor" para o sistema visual. Quanto maior a área, menor a sensibilidade visual naquele determinado comprimento de onda. Observando-se esse diagrama, fica patente que a discriminação de cores não é constante para todas as cores, variando de acordo com a cor observada. Assim, sabe-se que olho diferencia com precisão mudanças em tons azuis, diferencia menos as mudanças em tonalidades vermelhas e amarelas e de forma bem mais restrita com relação a tonalidades azuis-avermelhadas e azuis-esverdeadas. A experiência mostra ainda que o olho é mais sensível a **variações em intensidade** do que a **variações em cores**.

5.4 Composições coloridas

Todo mundo que já viu uma imagem de satélite colorida provavelmente já ouviu o termo **composição colorida falsa-cor**. Essa é a mais tradicional forma de se combinar 3 bandas espectrais de satélite para a formação de uma composição colorida e sem dúvida a mais usada. Para produzi-la, usando-se os sensores do satélite LANDSAT, são usadas as combinações MSS bandas 7, 5 e 4 e TM 4, 3 e 2 em RGB, respectivamente. A origem dessa combinação vem da época da 2ª Guerra Mundial, quando foi desenvolvido o filme colorido infra-vermelho para separar camuflagem da vegetação verdadeira. Como esse filme possui resposta espectral semelhante a essas combinações MSS e TM, as cores resultantes são similares. As combinações de bandas acima (MSS 7,5,4 e TM 4,3,2 em RGB) produzem imagens cujas cores coincidem com uma experiência já adquirida por fotointérpretes, onde a vegetação de cor verde reflete intensamente a energia eletromagnética no comprimento de onda relativo ao infra-vermelho, aparecendo portanto em cores vermelhas. Em relação ao TM, que possui bandas espectrais coincidentes com os comprimentos de onda da radiação visível, ao contrário do MSS, a combinação das bandas TM 3,2,1 em RGB é bastante utilizada, sendo portanto equivalente a uma composição **colorida real**, pois equivale às cores percebidas pelo ser humano.

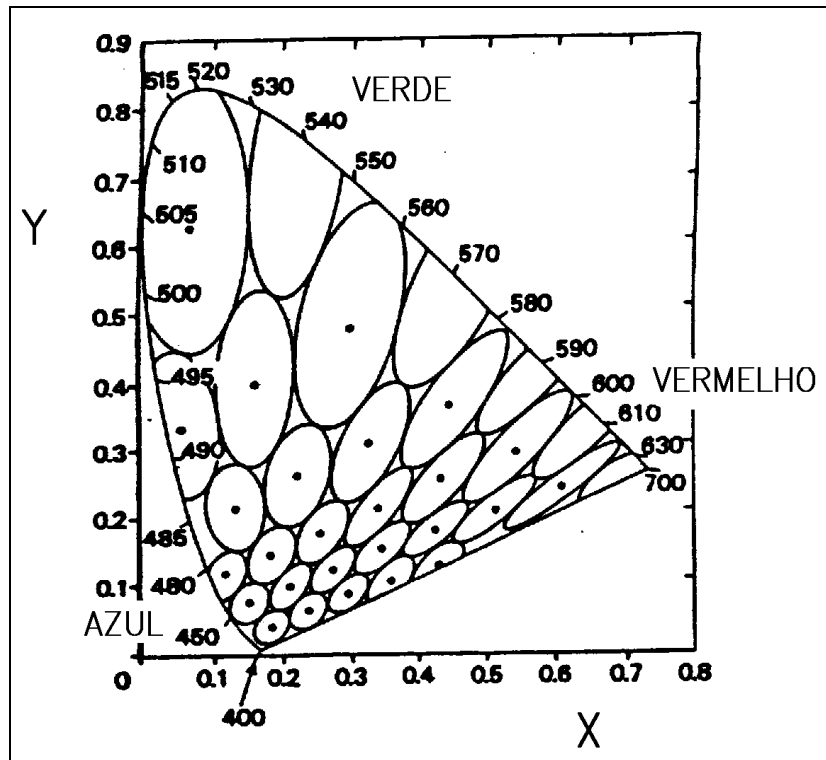


Figura 5.2 - Sensibilidade visual à mudanças de cores. Áreas ovais representam áreas de "mesma cor" para o olho. Quanto menor a área, maior a sensibilidade para a cor respectiva.

Na realidade, pode-se usar quaisquer três bandas para se produzir uma composição colorida. Contudo, uma cuidadosa seleção das mesmas faz-se necessária, para que a combinação de 3 bandas contenha a informação espectral realmente desejada. Isso obviamente se complica conforme aumenta o número de bandas, o que é uma tendência sempre crescente em sensores remotos. Em seguida, deve ser buscada uma alocação de cores que traduza para o olho humano essa informação da melhor forma possível. Embora a informação contida em um determinado triplete de bandas seja sempre a mesma, independentemente da alocação de cores, a diferença em percepção do nosso sistema visual faz com que diferentes combinações coloridas das mesmas 3 bandas pareçam na prática conter diferentes informações. Por isso, a seleção das bandas para compor uma composição colorida, assim como a alocação de cores, não são questões triviais e merecem a devida atenção, uma vez que pode-se desperdiçar informação.

Um ponto importante nessa questão: **nunca se deve aceitar "receitas" de composições coloridas de determinadas bandas em determinadas cores.** Cada cena de satélite possui características próprias e cada tipo de informação desejada

também. Por isso, deve-se procurar selecionar cuidadosamente as bandas a serem combinadas, com base nas características espectrais dos alvos desejados, e tentar diversas combinações de cores, até achar uma que mais satisfaça ao olhos. Pode-se, para isso, usar o diagrama da Figura 5.2, atribuindo cada cor de acordo com a visibilidade relativa da feição de interesse. Isso pode significar alocar a banda com **informação textural à cor verde** (pois textura geralmente é dada por variações na intensidade de uma imagem, sendo que o olho é muito sensível a mudanças em intensidade e não o é com relação à cor verde), enquanto as bandas contendo **feições espectrais mais sutis seriam alocadas às cores azul e vermelho** (para as quais o olho é mais sensível). Desse modo, a heterogeneidade da percepção visual seria compensada em parte, tornando a composição colorida mais eficaz.

5.5 Aumento de contraste em composições coloridas

Como foi visto anteriormente, as imagens de satélite são adquiridas com um contraste original relativamente baixo. Ao serem combinadas a cores, em tripletes, esse baixo contraste vai ser expresso também na distribuição de cores, no sentido de que somente um pequeno intervalo de cores, dentre todas as possíveis, será utilizado. Do ponto de vista gráfico, tomando-se o cubo RGB da Figura 5.1, seria o equivalente a dizer que apenas um pequeno "sub-cubo" de coordenadas r',g',b' estaria sendo utilizado. Essa restrição traz problemas na interpretação da imagem, uma vez que o sistema visual não consegue discriminar cores dentro de um pequeno intervalo. Para o intérprete, o colorido de uma imagem sem contraste aparecerá "desbotado". Por isso, o aumento de contraste é essencial na produção de composições coloridas e todas as técnicas de aumento de contraste discutidas anteriormente podem ser aplicadas, considerando-se a adequação de cada uma delas a situações específicas.

Dois pontos importantes quando se fala em aumento de contraste para composição a cores. Primeiramente, deve-se notar que alguns tipos mais "exóticos" de funções de transferência podem produzir alguns "buracos" na distribuição de intensidades de uma imagem (dada a natureza discreta das imagens digitais). Esses "buracos", por sua vez, vão se traduzir na supressão de tonalidades na composição colorida final, sendo portanto indesejáveis. Em segundo lugar, deve ser enfatizado que o olho capta mais precisamente mudanças em intensidade do que mudanças em cor, de tal forma que um excessivo aumento de contraste numa composição colorida vai

eventualmente produzir uma imagem com uma certa "sobrecarga" visual, que no lugar de auxiliar, pode na verdade confundir o intérprete.

5.6 A correlação espectral e suas consequências na composição colorida

Imagens produzidas por sensores multi-espectrais sofrem intrinsecamente de uma limitação: como muitas vezes as diversas bandas espectrais (ou intervalos de comprimento de onda) que compõem a imagem são contíguas, há uma grande repetição da informação espectral de uma banda para outra. Exemplificando: a sombra topográfica criada pela projeção dos raios solares oblíquos ao terreno imageado sempre aparecerá escura numa imagem de satélite, independente da banda considerada; portanto, os pixels relativos a essas zonas sombreadas terão um baixo DN em todas as bandas, sendo então ditos **correlacionados** do ponto de vista espectral. Considerando o cubo RGB, o que acontece ao se combinar três imagens com alta correlação para criar uma composição colorida é que a distribuição das intensidades vai se dar ao longo do **eixo cinza** ou **acromático**. Isso significa que, por mais que se tente aumentar o contraste de 3 bandas correlacionadas entre si, nunca vai se conseguir uma boa distribuição de cores na composição colorida.

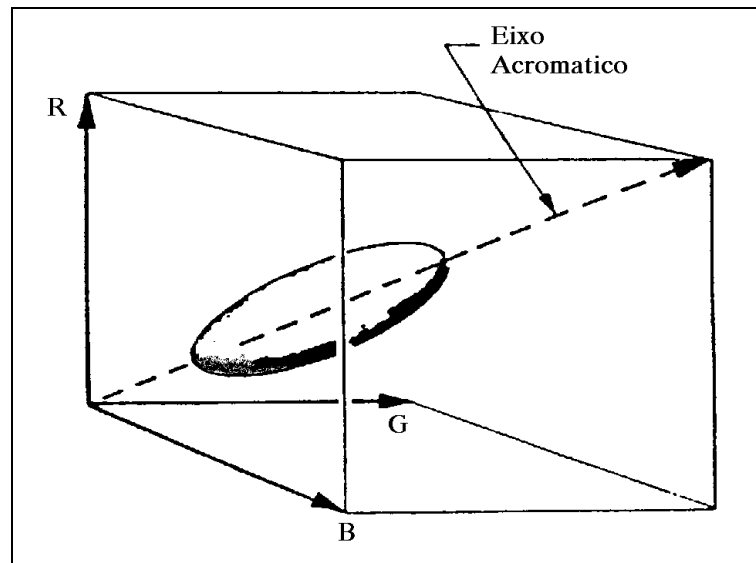
A Figura 5.3a mostra o histograma tri-dimensional de 3 bandas correlacionadas, cuja distribuição de intensidades se dá ao longo do eixo acromático; ao se aumentar o contraste das 3 bandas, consegue-se apenas esticar o elipsóide ao longo do eixo acromático, aumentando a intensidade da distribuição de cores sem contudo fazer uso do espaço de cores disponíveis.

Existem maneiras de remover essa correlação inter-bandas antes de combiná-las a cores e, desse modo, utilizar melhor o espaço de cores, produzindo imagens com grande variação de tonalidades. As técnicas mais comuns de remoção da correlação são a **Transformação HSI** e o **Realce por Decorrelação**. A primeira dessas técnicas será tratada a seguir, ao passo que a segunda será vista quando for abordada a Análise por Principais Componentes.

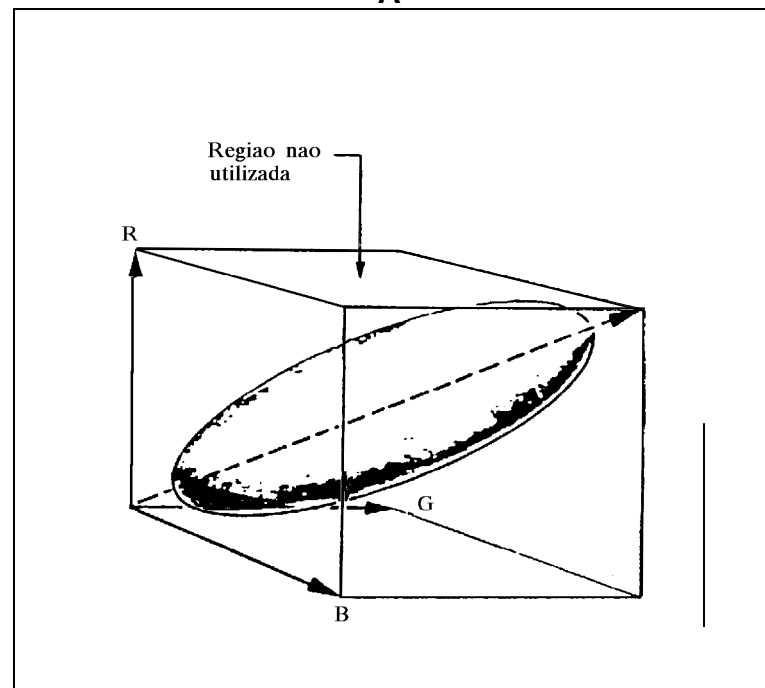
5.7 Transformação HSI

O espaço de cores conhecido por **HSI** (*Hue, Saturation, Intensity*) é uma forma alternativa ao espaço RGB de representação de cores. No espaço HSI, as cores são

definidas por três atributos, ao invés de três quantidades de cores primárias. Esses atributos são: **Intensidade** (*Intensity-I*), **Matiz** (*Hue-H*), **Saturação** (*Saturation-S*).



A



B

Figura 5.3 - A - A correlação entre as bandas faz com que o histograma tridimensional de uma composição colorida tenha a forma alongada, geralmente centrada ao longo do eixo acromático.

B - O aumento de contraste aplicado às três bandas expande a distribuição original, mas não elimina a correlação; as regiões não utilizadas do espaço de cores permanecem.

Esses atributos podem ser analisados e manipulados individualmente, ao contrário do sistema RGB, onde eles são intrinsecamente interligados. Eles descrevem a formação de cores de uma maneira muito mais próxima àquela pela qual o sistema visual humano as percebe e, devido a isso, o sistema HSI apresenta vantagens nítidas em relação ao sistema RGB. **Matiz** de um objeto é a medida do comprimento de onda médio da luz que ele reflete ou emite, definindo portanto a cor do objeto. **Intensidade** é a medida da energia total envolvida em todos os comprimentos de onda, sendo portanto responsável pela sensação de brilho dessa energia incidente sobre o olho. **Saturação**, ou pureza, expressa o intervalo de comprimentos de onda ao redor do comprimento de onda médio no qual a energia é refletida ou transmitida; um alto valor de saturação resulta em uma cor espectralmente pura, ao passo que um baixo valor indica uma mistura de comprimentos de onda, que irá produzir tons-pastel (apagados). O espaço IHS pode ser graficamente representado como um cone. A relação espacial entre o espaço RGB e o IHS é mostrada na Figura 5.4.

O sistema HSI utiliza coordenadas cilíndricas polares para representar as cores, ao invés de coordenadas cartesianas como o sistema RGB. A distância de um ponto até a origem ou ápice do cone representa a **intensidade** ou **brilho**. A distância radial do ponto até o eixo central do cone representa a **saturação** da cor. O **matiz** é representado como uma sequência radial ao redor dos círculos de saturação e do eixo de intensidade; embora o matiz varie na prática de 0 a 255, devido às características das imagens digitais, seu valor representa na verdade um ângulo que varia de 0 a 360°, sendo que 0° significa a cor verde (DN=0), 120° representa o vermelho (DN=85), 240° é a cor azul (DN=170) e 360° é o verde novamente (DN=255). Por serem independentes, esses três parâmetros podem ser analisados e modificados separadamente, para melhor se ajustar as cores às características do sistema visual.

O sistema HSI é usado no processamento de imagens de satélite através de um processo de múltiplas etapas, esquematizado na Figura 5.5. Primeiramente, três bandas contendo as informações espectrais de interesse são selecionadas, fazendo-se então os cálculos do matiz, saturação e intensidade para esse triplete; esses cálculos são feitos através de algoritmos matemáticos que relacionam os dois espaços de cores. Esse processo produz três novas imagens (H', S', I') representando respectivamente a intensidade, a saturação e o matiz do triplete original. Em seguida, aplica-se um aumento linear de contraste (ALC), para expandir o intervalo de intensidade e de saturação, de forma idêntica ao processo comumente aplicado para

aumentar o contraste de uma imagem qualquer, produzindo as imagens contrastadas H'' , S'' , I'' . A última etapa do processo envolve uma reversão dessas tres imagens para as coordenadas RGB (produzindo as imagens R'' , G'' , B''), uma vez que os monitores de vídeo dos sistemas de processamento de imagens trabalham somente nesse sistema. Da mesma forma que a transformação RGB→IHS, a transformação inversa é feita matematicamente.

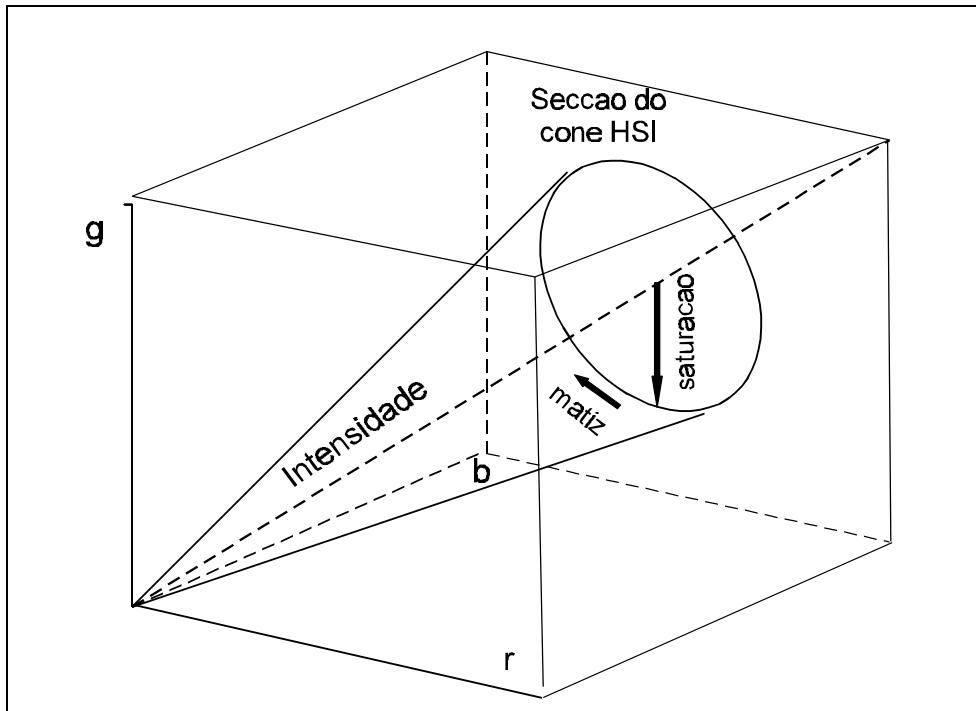


Figura 5.4 - Diagrama esquemático mostrando a relação entre os espaços HSI e RGB; o cone representando o espaço HSI possui uma origem comum com os eixos r, g, b . O ápice do cone HSI representa a cor preta, enquanto o seu eixo coincide com o eixo acromático. A intensidade aumenta em sentido contrário ao do ápice. Uma secção circular do cone mostra a variação de matizes ao redor do perímetro. A saturação de matizes aumenta para fora do centro, passando de cinza para tons-pastel e destes para matizes espectrais puros. (Modificado de Drury, 1987).

Os usos dessa técnica em sensoriamento remoto são de dois tipos: produzir composições coloridas com correlação interbanda reduzida, conseqüentemente com melhor utilização do espaço de cores, e combinar diferentes tipos de imagens, ou mesmo imagens de natureza diferente. Exemplos desses dois últimos tipos de utilização são a fusão de imagens SPOT/Pan (composta por apenas uma banda) e TM e integração de imagens de satélite com informações geofísicas. No caso da fusão SPOT/TM, o procedimento envolve calcular os componentes H, S e I a partir das três bandas seleccionadas do TM, aplicar o aumento de contraste nos componentes H, S

e na imagem SPOT/Pan, substituir o componente I pela imagem SPOT e aplicar a transformação inversa HSI->RGB. Desse modo, é possível a obtenção de uma composição colorida com a resolução espectral correspondente às três bandas TM e a resolução espacial da imagem SPOT/Pan (que é de 10 metros, contra 30 metros das imagens TM).

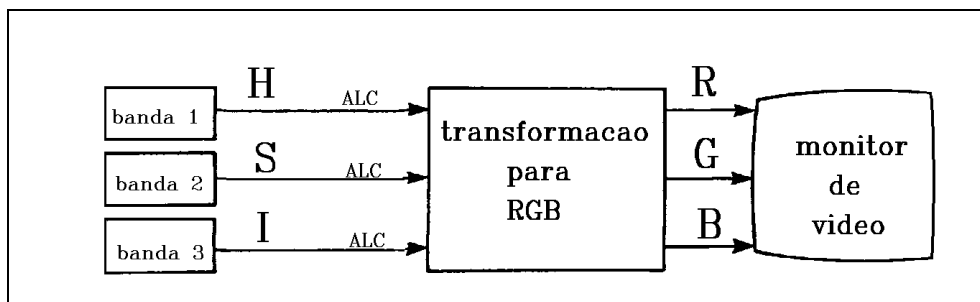


Figura 5.5 - Esquema da transformação RGB->HSI->RGB. Notar que após o cálculo das componentes HSI, elas sofrem um aumento de contraste, linear ou não.

5.8 Pseudo-cor

Algumas vezes, é desejável o uso de cor para realçar algum tipo de informação em uma imagem originalmente preto-e-branco. A técnica pela qual uma imagem monocromática é traduzida em cores é denominada **pseudo-cor**. Em processamento de imagens isso é feito através da transformação da escala de níveis de cinza em escala de cores, ou seja, atribuindo-se diferentes cores para intervalos de DN's. A vantagem dessa técnica é a de realçar pequenas diferenças de DN's da imagem monocromática; por exemplo, se atribuirmos a cor vermelha ao intervalo $41 \leq DN \leq 50$ e a cor verde ao intervalo $51 \leq DN \leq 60$ os pixels correspondentes serão facilmente separáveis, ao passo que na imagem monocromática isso não ocorreria. Por outro lado, essa técnica só funciona se houver áreas com diferentes intervalos de DN's, porém homogêneas internamente, pois informações de detalhes em imagens são geralmente perdidas devido à transformação do intervalo 0-255 para um intervalo com um número menor de cores.

A técnica de pseudo-cor pode ser implementada através da manipulação das "look-up tables" (LUTs), como mostrado na Figura 5.6. Na parte superior da figura são mostradas as LUTs para a imagem monocromática, que são todas iguais, enquanto na parte inferior encontram-se as LUTs transformadas. Como cada uma das LUTs

alimenta um dos inputs de cor (R, G e B), a imagem exemplificada na Figura 5.6 vai ser exibida no monitor de vídeo com o intervalo de DN's de 0 a 84 em vermelho, de 85 a 169 em verde e de 170 a 255 em azul.

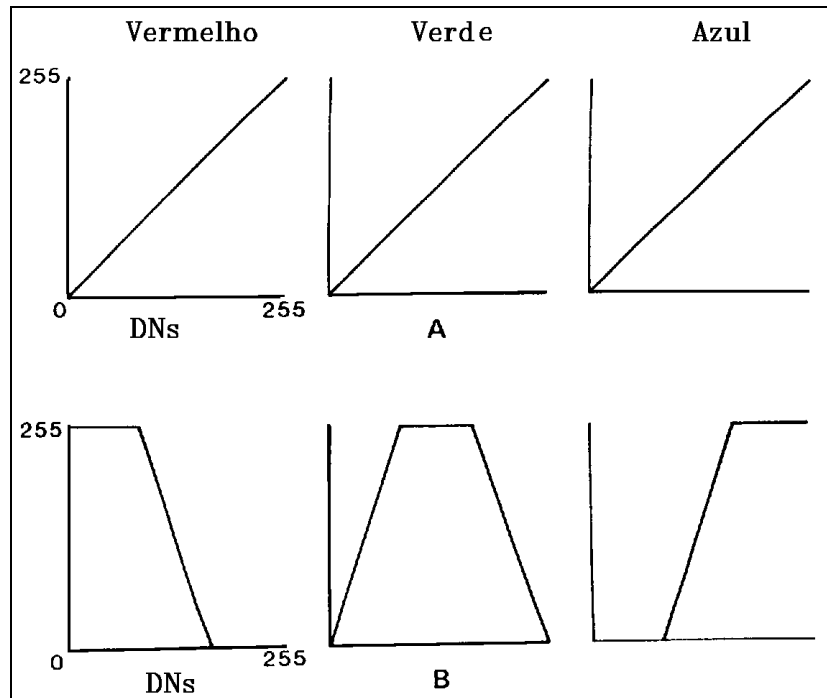


Figura 5.6

A - LUTs para visualização da imagem monocromática.

B - LUTs para visualização em pseudo-cor da imagem monocromática.

Uma outra técnica para obtenção de imagens pseudo-coloridas exige um pouco mais de sofisticação, sendo disponível como opção interativa e em alguns programas de processamento de imagens. Através dela pode-se controlar o matiz inicial (atribuído aos DN's mais baixos), o número de vezes em que cada uma das cores em volta do círculo de matizes será alocada e o número de cores usadas em cada volta no círculo. Por ser interativa (o usuário está observando as cores enquanto seleciona os parâmetros), esse método é mais eficiente e permite um total controle por parte dos usuários sobre o produto final.

A pseudo-cor é bastante usada em processamento digital de imagens de S.R. para representar o resultado final de classificações estatísticas, em que no máximo poucas dezenas de classes são definidas, não havendo portanto necessidade de se

usar um grande número de cores. Outro uso, esse já fora do S.R., é na representação de modelos digitais de elevação (DEM) e também para apresentação de imagens representando grandezas geofísicas, geoquímicas e outras.