

7. OPERAÇÕES ARITMÉTICAS EM IMAGENS

7.1 Introdução

Várias operações matemáticas simples são usadas em processamento digital de imagens de S.R., no sentido de analisar imagens multi-espectrais (diferentes bandas espectrais de uma mesma cena) e/ou multi-temporais (bandas individuais adquiridas sobre uma mesma área em diferentes datas). São normalmente utilizadas duas ou mais imagens da mesma área geográfica, sempre previamente co-registradas (isto é, cada pixel das duas imagens se refere exatamente à mesma área no terreno). O *input* de uma operação desse tipo é representado então por duas ou mais imagens e o *output* é uma única imagem representando o resultado da combinação das imagens originais de acordo com alguma regra matemática, realizada **pixel-a-pixel**. Alguns exemplos de operações aritméticas com imagens são **adição**, **subtração**, **multiplicação** e **divisão**, esta última também conhecida por **razão de bandas** (*band ratio*, em inglês).

Muitas vezes é desejável que a informação espectral contida num conjunto de bandas multi-espectrais seja **comprimida em um número menor de bandas**, sendo esse número idealmente igual a 3, para permitir que elas sejam combinadas usando-se as três cores básicas (RGB) em um monitor de vídeo. Isso é conhecido como **redução da dimensionalidade dos dados originais**. As técnicas aritméticas aqui tratadas possibilitam essa redução, pois cada imagem resultante dessas operações representará uma função da informação espectral originalmente contida nas duas ou mais bandas originais usadas como *input*. Por exemplo, se as 6 bandas refletidas do TM forem multiplicadas ou divididas duas a duas, produzindo então 3 novas bandas, estas últimas irão conter na verdade as informações das 6 bandas originais, caracterizando uma compressão. A questão da compressão envolve porém uma perda de informação original, pois **nem toda a informação original será realçada**. Deve-se lembrar que o resultado das operações aritméticas sempre ultrapassará o intervalo 0-255, devendo ser redimensionada para esse intervalo após a operação; isso acarreta uma perda de informação espectral.

Como regra geral, pode-se dizer que a **adição e a multiplicação servem para realçar similaridades espectrais** entre bandas ou diferentes imagens, ao passo que a **subtração e a divisão servem para realçar diferenças espectrais**. Dentre essas operações, a razão de bandas é provavelmente a mais utilizada, sendo de particular interesse em aplicações em geologia, agricultura e meio-ambiente.

7.2 Adição de imagens

A adição de imagens é a mais simples das operações envolvendo duas ou mais imagens. Pela natureza do processo de adição, esta é uma **operação linear**. Uma vez que os valores de intensidades (DNs) das imagens a serem somadas se situam no intervalo 0-255, o resultado da adição de N imagens vai estar situado no intervalo 0-255 x N . Portanto, alguma forma de compressão de contraste se faz necessária para que a imagem resultante possa ser mostrada em um monitor de vídeo de 8 bits, comum aos sistemas de processamento de imagem. Isso é geralmente obtido dividindo-se o resultado da operação de adição por N , o que vai produzir uma compressão de volta ao intervalo 0-255; outra maneira é determinar o máximo e o mínimo DN da imagem adicionada, usando o valor máximo para determinar o fator de escala para comprimir a imagem no intervalo 0-255.

A adição pode ser vista portanto como uma forma de se obter a **média aritmética** entre as imagens sendo operadas. Uma das aplicações da adição baseia-se justamente nessa sua capacidade de produzir uma média aritmética, no sentido de **diminuir o ruído** usualmente presente em imagens de sensoriamento remoto. O ruído eletrônico presente em imagens desse tipo não é geralmente correlacionado entre diferentes bandas espectrais. Isso quer dizer que, considerando os pixels individualmente em cada banda espectral da imagem, se numa dada banda um determinado pixel apresenta-se com ruído, é muito provável que nas demais bandas isso não ocorra. Ao se tirar a média aritmética dessas bandas, o ruído desses pixels tende a desaparecer, uma vez que os valores de DN para esses pixels serão determinados pela média dos pixels, com e sem ruído.

Essa capacidade da adição de produzir a média das bandas adicionadas pode ser usada também para se redefinir uma nova banda espectral. Isso é particularmente útil quando se deseja identificar um objeto ou fenômeno que seja caracterizado por feições espectrais bastante largas em termos do intervalo de comprimento de ondas, que extrapolam uma ou mais bandas de um sensor. Nesses casos, pode ser útil a redefinição de uma "nova" banda, a partir da média, digamos, das três bandas da faixa visível do TM (neste caso, bandas 1, 2 e 3). Considerando os atuais sensores orbitais, que possuem no máximo 7 bandas espectrais (o caso do TM), essa capacidade nem sempre é de grande utilidade. Considerando porém que já existem em operação sensores aero-portados com até 224 bandas espectrais (o AVIRIS, da NASA) e que na próxima década deverão existir sensores similares em operação a nível orbital, constata-se que a redefinição de bandas por adição poderá vir a assumir importância dentre as técnicas de processamento comumente utilizadas. Usando-se como exemplos os satélites atuais, essa técnica pode ser utilizada para produzir uma imagem

pancromática com as bandas 1, 2 e 3 do TM e compará-la com outras imagens pancromáticas, tais como as produzidas pelo SPOT/Pan ou pelo sensor RBV do satélite LANDSAT 3.

Outra aplicação para a adição de imagens é a **combinação de resultados de outros tipos de processamento**. Um exemplo disso é a adição de uma imagem original à sua versão submetida a um filtro de convolução para realce de bordas. Conforme visto anteriormente, esse processo permite combinar a informação tonal da imagem original com a informação textural da imagem filtrada, produzindo uma imagem com ótimas características de interpretação.

7.3 Subtração de imagens

A subtração entre imagens, sejam elas diferentes bandas de uma mesma imagem ou a mesma banda de diferentes imagens, **serve para realçar pequenas diferenças espectrais**, refletidas por diferenças em DN's. Da mesma forma que a adição, a subtração representa também uma **operação linear**, cujos resultados vão produzir intensidades fora do intervalo 0-255 (na realidade, o intervalo neste caso é de -255 a +255), necessitando portanto de um ajuste de contraste. Esse ajuste é implementado adicionando-se 255 ao resultado, o que vai produzir um novo intervalo 0-510, e dividindo-se este por 2, retornando portanto ao intervalo 0-255.

A diferença, ou subtração, entre bandas é bastante útil na identificação de diferenças sutis em comportamento espectral de determinados alvos em imagens multi-espectrais. Alguns exemplos são a **identificação de diferentes tipos de cobertura vegetal** utilizando os comprimentos de onda relativos ao infravermelho próximo, através por exemplo da diferença entre as bandas 6 e 7 do MSS, e a **quantidade de vegetação presente**, usando a diferença MSS7-MSS5. Outro exemplo é a **identificação de minerais formados por óxidos de ferro**, que exibem alta reflectância no vermelho e baixa reflectância no azul, de forma que uma diferença entre as bandas 3 (equivalente ao vermelho) e a 1 (azul) do TM vai realçar as áreas com solos ricos em material ferruginoso, tais como formações lateríticas. Tendo-se em mente as curvas de comportamento espectral dos alvos de interesse, bem como o posicionamento das bandas dos sensores disponíveis, é possível então traçar uma estratégia de realce de diferenças espectrais, usando-se a subtração de bandas.

Outra aplicação bastante comum da subtração é na **detecção de padrões de mudança da cobertura em imagens**. Essas mudanças da cobertura podem significar uma infinidade de fenômenos, tais como desmatamento, mudanças no uso do solo, diferenças sazonais na vegetação, expansão de áreas urbanas, diferenças no sombreamento topográfico devido à mudanças sazonais no ângulo

de iluminação solar e muitas outras. Para isso são usadas duas imagens da mesma banda do mesmo sensor, porém tomadas em diferentes épocas, por exemplo, com alguns anos de diferença. Calculando-se a diferença entre essas imagens e observando-se o histograma dessa nova imagem, o resultado será similar ao apresentado na Figura 7.1. O **histograma possui uma distribuição normal**, com um pico no DN=127 e caindo rapidamente em ambos os lados. O **pico em 127 representa os pixels que não mudaram** no período de tempo considerado, ao passo que **os picos menores em ambos os lados do histograma representam os pixels que mudaram**.

Um ponto importante acerca da subtração de imagens diz respeito à **existência de diferenças de contraste entre as duas imagens a serem subtraídas**. Ocorre que muitas vezes as duas imagens possuem diferentes médias e contrastes entre si, ou seja, **seus histogramas não coincidem em termos de média e desvio-padrão**. Se essas duas imagens forem subtraídas dessa forma, o que vai acontecer é que a informação que é comum a ambas não será atribuída ao valor 127 do exemplo da Figura 7.1, mas **haverá uma maior tendenciosidade em relação à imagem com maior contraste**. A solução nesse caso é aplicar um aumento de contraste adequado a ambas as imagens, antes da subtração, para equalizar a média e o desvio-padrão de seus histogramas. Isso deve ser feito com uma técnica de aumento de contraste linear, tal como aquela denominada "Realce de Contraste Balanceado" vista anteriormente.

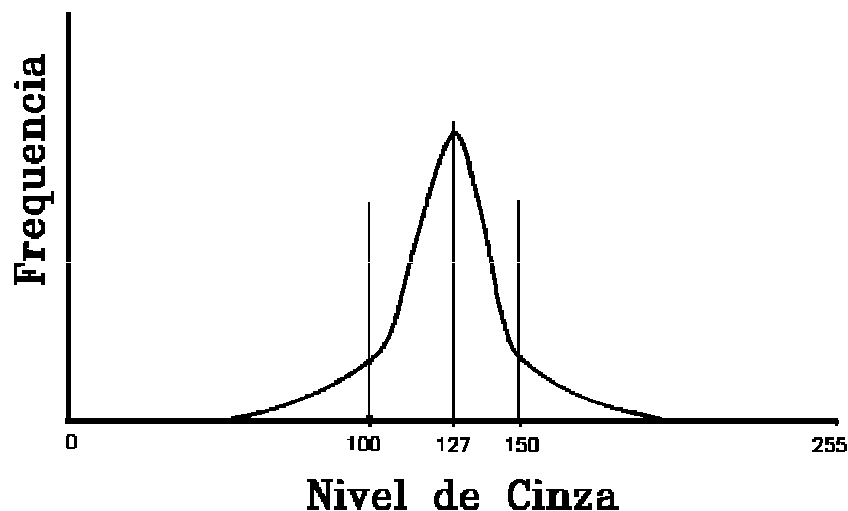


Figura 7.1 - Histograma de uma imagem produzida pela subtração de duas outras. Pixels que não apresentam nenhuma diferença possuem valor 127. Os pixels com maior diferença estão entre 0-100 e entre 150-255.

7.4 Multiplicação de imagens

A multiplicação de imagens não é uma técnica de uso frequente em processamento de imagens de sensoriamento remoto. Trata-se de uma **operação não-linear**, capaz de gerar resultados bastante fora do intervalo 0-255. Dois pixels com valor 255, quando multiplicados, darão um valor de 65.025. Isso requer uma compressão de contraste bastante intensa, para que o resultado possa ser exibido em um monitor de vídeo de 8 bits.

Assim como na adição, na multiplicação **a informação que é comum a ambas as imagens sendo multiplicadas é realçada**. Isso porque, no caso de um pixel de uma das imagens ter um DN alto, enquanto o mesmo pixel na outra possui um DN baixo, o resultado será baixo (notar que, se um deles possui DN=0, o resultado da multiplicação será 0); já se ambos tiverem alto DN, o resultado será altíssimo, realçando portanto a informação representada por números digitais altos. Uma vez que, nas imagens de sensoriamento remoto, a informação que é comum a duas ou mais bandas é geralmente causada pelo efeito de sombreamento topográfico, pode-se deduzir que **o produto da multiplicação de 2 imagens de S.R. geralmente realça as feições morfológicas**, sendo portanto útil naquelas aplicações em que essas feições são importantes: geologia estrutural, geomorfologia, cartografia e outras.

Com base nessa propriedade da multiplicação, uma técnica de integração ou de combinação de imagens foi desenvolvida. Ela permite que, dado um conjunto de 3 bandas com pouca ou nenhuma correlação entre si (ou seja, que não repitam informação espectral entre elas), que se deseja combinar como uma composição colorida, e uma quarta imagem que não apresente correlação com as 3 anteriores, se torne possível a obtenção de uma composição colorida que representa na verdade 4 dimensões ou componentes espectrais. Essa técnica é muito útil quando se quer combinar, por exemplo, 4 componentes principais geradas pelo TM as quais, como veremos em uma próxima seção, não possuem correlação. Neste caso, toda a informação morfológica (textural) fica concentrada na 1ª componente, que é denominada de **componente acromática**, ao passo que a informação espectral (tonal) é distribuída pelas demais três componentes, denominadas **componentes cromáticas**; ao se combinar essa 4 imagens através da multiplicação da 1ª componente pelas três outras, obtém-se uma imagem de 4 dimensões: uma dimensão textural, com a informação morfológica, a qual controla a intensidade da composição colorida e três dimensões tonais, contendo a informação espectral, as quais controlam a distribuição de cores. Esse método serve também para combinar uma imagem SPOT pancromática (10 metros de resolução espacial), como a componente acromática, com 3 imagens TM não correlacionadas, as quais podem ser 3 componentes principais, 3 razões de bandas ou 3 bandas realçadas por decorrelação. Essa combinação possui a

enorme vantagem de apresentar, numa mesma imagem colorida, a informação textural/morfológica com uma resolução espacial de 10 metros, ao mesmo tempo que contém a informação espectral das 3 imagens cromáticas.

7.5 Divisão de imagens (razão de bandas)

A divisão de imagens é sem dúvida a operação aritmética mais comum em processamento digital de imagens de S.R., sendo bastante utilizada na determinação dos chamados **índices de biomassa ou de vegetação** e também na **identificação de zonas de alteração hidrotermal relacionadas a concentrações de minerais**. A exemplo da multiplicação, ela também é uma **operação não-linear** e produz resultados que necessitam ser re-escalados para o intervalo 0-255 antes de serem mostrados no monitor de vídeo. A divisão serve para **realçar intensamente as diferenças espectrais de um par de bandas**, sendo que os extremos branco e preto da distribuição de níveis de cinza representam as maiores diferenças em reflectância entre as duas bandas consideradas. A divisão é feita pixel-a-pixel entre duas bandas e, quando o DN do denominador da divisão é maior do que o do numerador, o resultado é menor do que 1, dando um resultado que será obviamente representado por um pixel escuro. Ao contrário, quando o numerador for maior do que o denominador, a divisão será maior do que 1, dando um pixel claro no resultado. Quando os valores do denominador e do numerador forem os mesmos, não há diferença entre as duas bandas para aquele pixel.

Existem alguns problemas práticos com a divisão de bandas. Primeiramente, existe **a questão do ruído eletrônico existente nas razões**, o qual, por ser não correlacionado entre as bandas, tende a ser exagerado pela divisão (um alto valor espúrio tanto no numerador quanto no denominador vai produzir um valor extremo, branco ou preto). O alto conteúdo em ruído normalmente presente em razões de banda pode ser removido usando-se então os filtros tratados anteriormente.

Outro problema diz respeito ao **espalhamento atmosférico** da radiação solar, o qual varia de acordo com o comprimento de onda considerado e, portanto, vai afetar diferentemente cada banda. Esse efeito atmosférico diferencial, chamado em inglês de "*atmospheric scattering*", precisa ser removido antes de se calcular uma razão de bandas, do contrário o resultado será espúrio e não representará a diferença de reflectância entre os pixels das duas bandas. Existem diversas técnicas para estimar o espalhamento atmosférico para cada banda, algumas até bastante sofisticadas estatisticamente, mas o modo mais simples e rápido é o chamado **subtração de pixel escuro** ("*dark pixel subtraction*"). Ela se baseia na subtração de um valor de cinza, o qual

representaria o efeito de espalhamento, determinado para cada banda individualmente. A determinação desse valor de cinza é feita empiricamente, com base no fato de que áreas com águas profundas devem refletir a radiação solar, aparecendo com DN próximo a zero (águas rasas geralmente possuem sedimentos em suspensão, os quais refletem a radiação e, portanto, não servem para este propósito). Neste caso, é necessário que exista ao menos uma área de águas profundas na imagem, para que sejam definidos os valores a serem subtraídos de cada banda. Na falta destas, áreas de sombra topográfica intensa podem servir como uma aproximação.

Um terceiro problema é relacionado a materiais com características de reflectância semelhantes, porém com diferentes intensidades. A Figura 7.2 mostra as linhas de mesma razão para um par de bandas. Notar que a linha de razão igual a 1 está a 45°, representando todos os pixels que possuem o mesmo valor de intensidade nas duas bandas, o que é típico de imagens correlacionadas. Qualquer pixel cujas intensidades espectrais plotam ao longo de uma dessas linhas será representado pelo mesmo valor de intensidade na imagem resultante, **independentemente da sua distância a partir da origem**. Essa característica também mostra uma das maiores limitações da imagens de razão: se dois objetos distintos possuem cores similares, porém diferentes intensidades médias (também chamado de **albedo**), as suas intensidades vão estar ao longo de uma mesma linha de razão constante. Embora fossem perfeitamente separáveis nas imagens originais, esses objetos se tornariam indistinguíveis na imagem produzida pela divisão. A Figura 7.3 exemplifica esse caso.

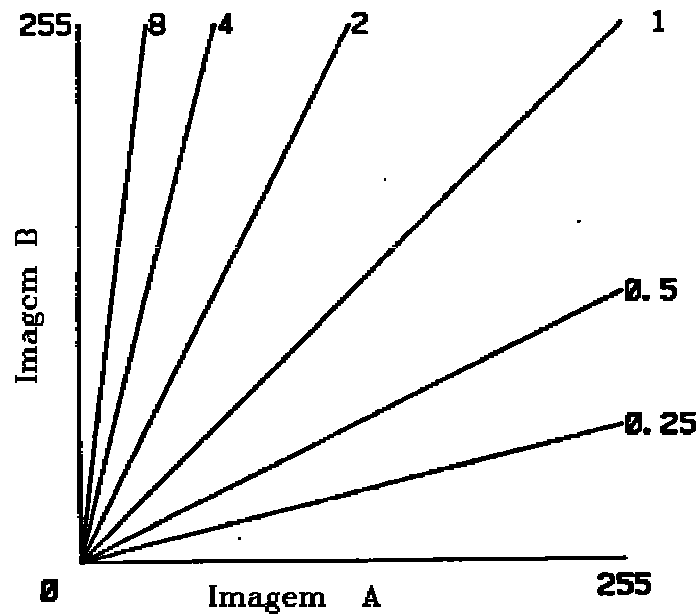


Figura 7.2 - Linhas de mesma razão representadas no scattergrama bidimensional de duas imagens A e B.

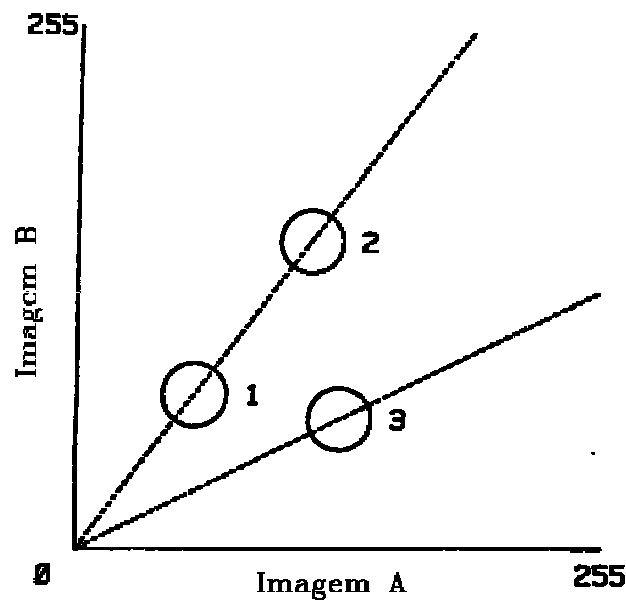


Figura 7.3 - Os objetos 1, 2 e 3 possuem diferentes intensidades e poderiam ser diferenciados considerando-se essas duas bandas. Ao se dividir essas bandas, os objetos 1 e 2 passariam a ser indistinguíveis, pois encontram-se sobre uma mesma linha de razão constante, apesar do objeto 2 possuir mais contraste do que o objeto 1. (Modif. de Canas, 1987).

Outra característica das imagens produzidas pela divisão de bandas é a **ausência do sombreado topográfico**. Isso se deve ao fato que o sombreado representa informação espectral que é altamente correlacionada entre as diversas bandas e, portanto, os pixels sombreados vão plotar ao longo da linha de mesma razão (igual a 1) da Figura 7.2 e vão ser suprimidos do resultado. Pode-se dizer portanto que **as razões de banda minimizam as diferenças nas condições de iluminação de uma cena**, conforme mostrado na Figura 7.4. Ocorre que, se a correção do espalhamento atmosférico não for feita com precisão, o efeito de sombreado não será totalmente eliminado.

A propriedade mais importante da razão de bandas, e o motivo pelo qual ela é bastante utilizada, é a sua **capacidade de realçar imensamente determinadas feições da curva de assinatura espectral dos alguns materiais naturais**. Se as bandas a serem divididas forem selecionadas de forma a cobrir máximos e mínimos de absorção, assim como mudanças na inclinação da curva de assinatura, elas podem ser combinadas em pares de razões, para acentuar aspectos das assinaturas espectrais dos materiais.

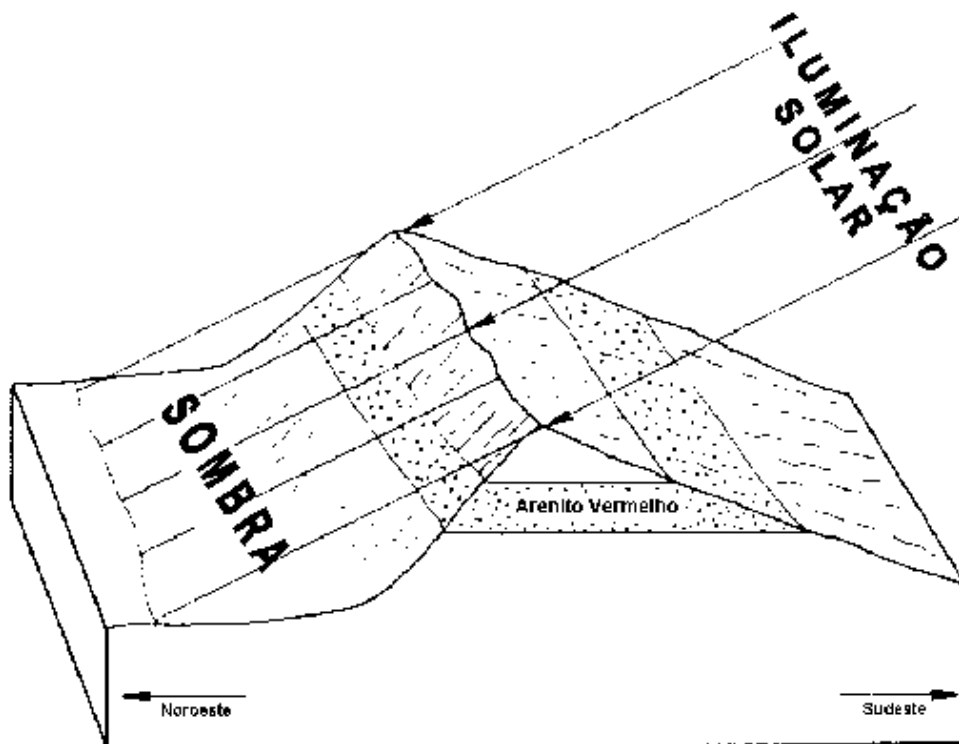


Figura 7.4 - Supressão de diferenças em iluminação de banda. A área pontilhada representa um tipo de rocha (arenito vermelho) que possui DN=94 na banda TM3 na área iluminada pelo sol e DN=76 na área sombreada. Já na banda 1 ela tem DN=42 na área iluminada e DN=34 na sombreada. Fazendo-se a razão TM3/TM1, obtêm-se um DN=2.24 para a área iluminada e DN=2.23 para a sombra, eliminando-se portanto a diferença (Modif. de Sabins, 1987).

Um exemplo simples é a **vegetação, que é caracterizada por uma intensa absorção devido à clorofila na região do vermelho e por uma intensa reflexão no infra-vermelho próximo**. Fazendo-se uma composição colorida usando essas bandas e outra qualquer, a presença de vegetação é óbvia, mas variações em intensidade, tipos, etc., não são fáceis de se identificar, simplesmente porque o olho humano possui um intervalo limitado de percepção. Contudo, essas variações **possuem o efeito de mudar a estrutura da curva de reflectância espectral**, particularmente no tocante à intensidade do mínimo de absorção da clorofila, o máximo de reflexão no infra-vermelho e o gradiente da curva entre o vermelho e o infra-vermelho. Pequenas mudanças nesses parâmetros possuem um efeito desproporcionalmente alto na razão das bandas correspondentes (MSS7/MSS5 ou TM4/TM1), de tal forma que as variações são muito mais facilmente interpretadas em uma razão de bandas.

Por esse motivo, razões de diversos tipos são utilizadas em estudos de vegetação para estimar a proporção de biomassa e para diferenciar entre diferentes espécies. Essa é a base para se definir razões de bandas mais complexas, desenvolvidas para estudos de vegetação, que envolvem divisão, soma e diferença entre bandas espectrais. A mais conhecida delas é o chamado **Índice Normalizado de Diferença de Vegetação (NDVI)**, originalmente desenvolvido para o MSS e posteriormente utilizado em escala global com o sensor de baixa resolução espacial denominado AVHRR. Nesses dois casos, o NDVI é calculado da seguinte maneira:

<p style="text-align: center;"><u>MSS</u></p> $\text{NDVI} = \frac{\text{MSS7} - \text{MSS5}}{\text{MSS7} + \text{MSS5}}$	<p style="text-align: center;"><u>AVHRR</u></p> $\text{NDVI} = \frac{\text{B2} - \text{B1}}{\text{B2} + \text{B1}}$
---	---

Da mesma forma, aplicações de razões de banda são bastante úteis em prospecção mineral. Neste caso, duas feições espectrais de interesse são geralmente utilizadas, uma delas relacionada à **presença de óxidos de ferro** (geralmente hematita e/ou goethita, sob o nome genérico de **limonita**), que são encontrados em associação com mineralizações de sulfetos, para a qual se usa as razão MSS6/MSS7 ou, mais eficaz, a razão TM3/TM1, entre outras possíveis.

A segunda feição espectral passível de ser realçada diz respeito a presença de **minerais de argila de alteração hidrotermal**, os quais são extremamente realçados na razão TM5/TM7 e que se associam à mineralizações auríferas. Na prática, o que se faz é selecionar três diferentes razões, tentando cobrir todas as feições espectrais de interesse, e produzir uma **composição colorida de razões** ("*color ratio composite*"), que não só sintetiza numa só

imagem a informação de pelos menos 6 bandas, mas também otimiza os contrastes de assinatura espectral entre diversos tipos de materiais superficiais. Por outro lado, as cores obtidas através dessa composições não possuem relação com aquelas obtidas por simples composições coloridas de bandas originais, necessitando para sua interpretação uma boa dose de raciocínio com base nas razões individuais e nas curvas espectrais dos materiais que se deseja realçar.