

Filtros de convolução proporcionais para realce de imagens

Fábio Cardinale Branco¹
Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida¹
Carlos Roberto de Souza Filho²

¹ Universidade de São Paulo - Instituto de Geociências
Rua do Lago, 562 - Butantã São Paulo - SP - C.E.P.: 05508-080
(fabio.tcl@uol.com.br)
(talmeida@usp.br)

² Universidade Estadual de Campinas - Instituto de Geociências
R. João Pandiá Calógeras, 51 – Campinas – SP CEP: 13083-970
(beto@ige.unicamp.br)

Resumo

Este trabalho apresenta um método inovador para realce tonal e de bordas em imagens digitais, com aplicações potenciais múltiplas em sensoriamento remoto geológico. O estudo envolveu o desenvolvimento de filtros de convolução (passa-altas e passa-baixas), cujos valores atribuídos às células do operador foram ponderados em função da distância de cada célula ao centro do operador – motivo pelo qual foram denominados de “filtros proporcionais”. Os filtros foram aplicados a uma imagem com variações de borda e tons específicos (uma imagem da luz emanada por uma chama), a uma imagem TM/Landsat-5 e testados qualitativa e quantitativamente. Esse ensaio permitiu uma avaliação ótima quanto aos efeitos produzidos pelos filtros proporcionais na ‘imagem-modelo’ e na imagem TM quanto a sua capacidade de realçar feições de borda (passa-altas) e informações tonais (passa-baixas).

Palavras-chave: remote sensing, image processing, convolution filtering, sensoriamento remoto, processamento de imagens, filtros de convolução.

Abstract:

This paper introduces an innovative approach for tonal and edge enhancement of digital images, with multiple potential applications in geologic remote sensing. The study involved the design of convolution filters (high-pass and low-pass), but considering the weighting of values attributed to each kernel’s cells as a function of the distance of a particular cell to the kernel’s center. Due to this reasoning these filters were coined as “proportional filters”. In order to test the filters both qualitative and quantitatively, they were applied to a image with specific edge and tonal variations – i.e., an image of the light emitted by a flame, and to a Landsat-5 TM image. This experiment allowed an accurate evaluation of the effects produced by the proportional filters in the control images, as well as their usefulness in the enhancement of edge (high-pass) and tonal (low-pass) information.

1. Introdução

Filtragens por convolução são técnicas tradicionais para o processamento digital de imagens que operam no domínio espacial. Consiste no realce de altas, médias ou baixas frequências de variação tonal da imagem, em detrimento das demais, alterando o valor de cada *pixel* da imagem com base no cálculo da média entre o *pixel* em questão e seus vizinhos, ponderada por valores pré-estabelecidos, dispostos em uma matriz, denominada operador. A filtragem é aplicada a uma imagem pelo processo conhecido como convolução (Curran, 1985). A grande maioria dos sistemas de processamento de imagens utilizam o processo de filtragem por convolução como a principal ferramenta de filtragem no domínio espacial devido à simplicidade de sua aplicação.

Essa ferramenta tem sido utilizada em imagens de sensoriamento remoto principalmente para a redução de ruídos (de Souza Filho *et al.*, 1996), detecção ou realce de bordas e realce tonal (Mather, 1999) e reconhecimento de texturas e formas (Bloom e Daily, 1982). Diversos operadores passa-altas, passa-baixas, passa-bandas, direcionais e texturais têm sido propostos para cada uma dessas aplicações (Holderman *et al.*, 1978). As duas principais características a serem consideradas para o desenvolvimento de filtros são as dimensões do operador e os valores a serem atribuídos a cada uma de suas células, ou pesos, uma vez que no processo de convolução o cálculo do valor de cada *pixel* da imagem gerada representa uma média entre os *pixels* vizinhos da imagem original, ponderados pelos valores correspondentes no operador.

As dimensões do operador determinam o tamanho das feições (medido em *pixels*), com comportamento espectral característico, que serão realçadas ou suavizadas. Utilizando um filtro passa-baixas, quanto maior o operador, maior a faixa de variação espacial da informação tonal que será consideradas como de “alta frequência” e que será, portanto, suprimidas ou suavizadas, de modo que o efeito de “desfocagem” da imagem cresce com as dimensões do operador. No caso de filtros passa-altas, quanto menor o operador, mais finas e próximas serão as bordas realçadas e vice-versa. Segundo Drury (2001), um filtro passa-altas realça feições cujas dimensões sejam menores que a metade da dimensão do operador utilizado. De um modo geral, podemos considerar que as dimensões do operador estabelecem um limite acima do qual as variações tonais são consideradas de frequência baixa, e abaixo do qual as variações são de alta frequência.

Quanto aos pesos a serem atribuídos às diferentes células do operador, observa-se que na maioria dos filtros descritos na literatura a distribuição de pesos é balanceada de forma a privilegiar os mais próximos da célula central, uma vez que, em princípio, quanto mais próximo um *pixel* estiver do *pixel* a ser substituído, maior será a correlação entre eles. Desta forma, serão reduzidas as distorções inerentes ao processo de filtragem de convolução, embora alguma distorção sempre persista, pois os pesos serão distribuídos de forma discreta e não contínua ao longo do operador.

Neste sentido foi desenvolvida uma nova ponderação dos pesos do operador, baseada nas distâncias de cada célula à célula central. Para a geração destes operadores, aqui denominados **operadores proporcionais**, foi desenvolvido um programa em linguagem Pascal que permite produzir matrizes de dimensões compreendidas no intervalo de 3x3 a 255x255. Ademais, é feita uma nova proposta para a aplicação dos filtros passa-baixas em imagens de sensoriamento remoto, qual seja, sua utilização para o realce das informações tonais (portanto, correlacionadas às respostas espectrais dos materiais superficiais) presentes.

2. Cálculo de filtros de convolução proporcionais

Analisando diversos filtros de convolução descritos na literatura (e.g., Mather, 1999), pode-se verificar que existe uma tendência de serem atribuídos pesos maiores às células mais próximas ao centro do operador. Essa tendência pode ser facilmente compreendida ao se considerar que durante o processo de convolução a cada instante é alterado apenas o *pixel* da imagem que estiver sendo multiplicado pela célula central do operador. Desse modo, as células mais próximas ao centro do operador estarão sendo multiplicadas pelos *pixels* mais correlacionáveis àquele que está sendo calculado. Nesse sentido, **um operador ideal** possuiria uma distribuição de pesos inversamente proporcional à distância de cada célula à célula central, melhor respeitando a geometria das feições presentes na imagem original.

Uma imagem pode ser representada como uma função $P(i,j)$ do DN de um dado *pixel* situado nas coordenadas i e j de linha e coluna, respectivamente. Um operador é uma matriz de dimensões $2M+1$ linhas por $2N+1$ colunas, de forma que sempre existe uma célula situada exatamente no seu centro. Cada célula do operador possui um peso, sendo o operador descrito pela função $C(k,l)$, onde k e l são as coordenadas de linha e coluna da célula de peso C .

A seguir é mostrado o cálculo para se obter operadores proporcionais.

Considerando um operador de $2M+1$ linhas por $2N+1$ colunas, e calculando a distância de cada célula ($C_{k,l}$) ao centro do operador, tem-se:

$$D_{k,l} = \sqrt{k^2 + l^2} \quad (1)$$

onde $D_{k,l}$ = distância da célula $C_{k,l}$ ao centro do operador.

k = indicador da coluna ($-M \leq k \leq +M$)

l = indicador da linha ($-N \leq l \leq +N$)

Aplicando-se o conceito de que na estrutura de um operador passa-altas o valor de cada célula (exceto para a célula central) deve ser negativo e inversamente proporcional à sua distância em relação ao centro do operador, verifica-se que:

$$C_{k,l} = \frac{-1}{D_{k,l}} = \frac{-1}{\sqrt{k^2 + l^2}} \quad (2)$$

Esta última equação (2) é válida para o cálculo de todas as células exceto a célula central, cujo valor será a soma dos valores absolutos das demais células, calculado segundo a expressão:

$$C'_{k,l} = \sum_{k=-M}^{k=+M} \sum_{l=-N}^{l=+N} \frac{1}{\sqrt{k^2 + l^2}} \quad (3)$$

No caso de operadores passa-baixas, o cálculo do valor das células vizinhas ao centro é essencialmente o mesmo, exceto pelo fato de todas terem valores positivos, ou seja, para operadores passa-baixas, temos:

$$C_{k,l} = \frac{1}{D_{k,l}} = \frac{1}{\sqrt{k^2 + l^2}} \quad (4)$$

A célula central de um operador passa-baixas, entretanto, pode receber valor nulo, pois a função de uma filtragem desse tipo é justamente excluir variações pontuais (de alta frequência) em favor daquelas de maior expressão espacial. Em outras palavras, o *pixel* original será substituído pela média ponderada entre os valores dos *pixels* vizinhos e as células correspondentes do operador, “regionalizando” a informação.

A **figura 1** ilustra como é a geometria de um operador passa-altas de 13×13 células desenvolvido segundo a técnica descrita, sendo exposto apenas o quadrante nordeste do operador e as linhas de isodistância com relação ao centro (e, portanto, de isovalores).

De modo a facilitar a geração dos filtros e posterior aplicação nas imagens-teste, foram criados, em linguagem pascal, dois programas que geram os operadores proporcionais (passa-altas e passa-baixas) em formato compatível com programas abertos (e.g., GRASS) e comerciais (e.g., ER-Mapper e ENVI)

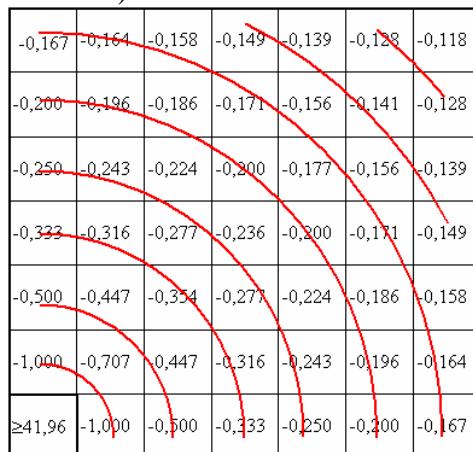


Figura 1: geometria de um operador passa-altas proporcional de 13x13 células. Somente o quadrante nordeste do operador é ilustrado, com as linhas de isovalores.

3. Testes quantitativos efetuados

Foram seguidas basicamente duas abordagens para analisar o funcionamento dos filtros propostos. Na primeira abordagem, partiu-se da premissa, já bastante conhecida, da exclusão da informação tonal por uma filtragem passa-altas e seu inverso, ou seja, da exclusão na mesma medida da informação de bordas por uma filtragem passa-baixas. No caso da aplicação dos operadores propostos não gerar deformações de monta, a princípio, será possível obter uma imagem integralmente correlacionável com a imagem original através da soma de imagens filtradas com operadores passa-altas e passa-baixas de iguais dimensões. Este teste foi realizado em uma imagem TM/Landsat 5 (WRS 222/81 de 20/08/1988) da região das Minas do Camaquã, RS, com a aplicação de operadores de 31x31 células e de 127x127 células, em um segmento de 350x350 *pixels* da banda TM4.

Mesmo tendo sido atingida a correlação de 100% neste teste, não foi possível afirmar se os operadores proporcionais geraram distorções, pois tais efeitos podem ter sido compensados no filtro complementar. Em outras palavras, as distorções derivadas da filtragem passa-altas podem ocorrer de forma inversa na filtragem passa-baixas. Assim, se a filtragem passa-altas não gera distorções, o mesmo ocorre na filtragem passa-baixas.

De modo a comprovar a inexistência de tais distorções, foi desenvolvida uma segunda abordagem, na qual foram verificadas as correlações numéricas existentes entre imagem original e filtradas com operadores de diversas dimensões. Nesta abordagem, foram testados apenas os filtros passa-altas, pelos motivos expostos anteriormente.

Como teste para os filtros passa-altas foi escolhido também um segmento da imagem da banda TM4, sobre o qual foram aplicados 28 filtros com dimensões entre 3x3 até 255x255. Posteriormente, foi calculado o grau de correlação entre cada imagem gerada e a imagem TM4 original, sendo traçada uma curva com os valores obtidos em função do número de células dos operadores.

Nessa operação, um aumento da correlação com o aumento das dimensões do operador é previsto, pois as feições de alta frequência são diretamente proporcionais às dimensões do operador. Num operador de 3x3 células, apenas as feições que apresentem uma das dimensões menor ou igual a dois *pixels* serão consideradas de alta frequência. No caso oposto, no limite em que as dimensões do operador forem iguais ou superiores às da imagem original, todas as

feições serão consideradas de alta frequência, e a imagem filtrada será idêntica à original (nenhuma informação de baixa frequência seria detectada). É importante destacar que, devido ao efeito de bordas, pelo qual perde-se a informação da borda da imagem (pelo qual as bordas da imagem perdem as primeiras M linhas e N colunas, pois além destes limites não existem *pixels* vizinhos suficientes na imagem original para que se possa efetuar o cálculo - Crósta, 1993) inerente ao processo de filtragem por convolução, tal teste não pode ser feito, podendo apenas ser observada a tendência da curva de correlação em se aproximar de 100%..

4. Testes qualitativos efetuados

Neste enfoque, é apresentada uma análise visual do funcionamento dos filtros passa-baixas no realce tonal (e, secundariamente, dos filtros passa-altas para o realce de bordas). Foram feitos testes com operadores de diversas dimensões em duas imagens distintas. Uma primeira, 'imagem-modelo', foi utilizada para a análise preliminar dos métodos propostos; a segunda imagem, do Landsat-TM, por sua vez consistiu numa aplicação real e prática dos filtros proporcionais.

No caso da 'imagem-modelo', filtros de diversas dimensões foram aplicados à imagem de uma chama de vela. O interesse de tal aplicação vem do conhecimento geral da subdivisão interna da chama em regiões com temperaturas e, conseqüentemente, com colorações diferentes. Considerando-se a hipótese de que os filtros passa-baixas ressaltam a informação tonal, tais variações devem ser mais nitidamente notadas nas imagens filtradas do que na original. Variando-se as dimensões do filtro, será possível analisar ainda a relação entre o tamanho do operador e das feições passíveis de serem realçadas.

Para estes testes a chama da vela foi fotografada com filme Fujicolor de ASA 100, desvio padrão da granularidade difusa de 9 (diffuse RMS granularity) e poder de resolução de 100 pares de linhas por milímetro em contraste de 1.000:1 em processo de revelação padrão. A fotografia obtida foi então digitalizada em um scanner HP Scanjet 4p, a uma resolução de 400 pontos por polegada (DPI) em 3 canais (vermelho, verde e azul) de 8 bits, produzindo uma imagem digital no formato JPEG sem compressão.

No teste dos filtros passa-baixas foram utilizados operadores de diversas dimensões, tendo sido escolhidas quatro das imagens, obtidas pelos operadores de 45x45, 65x65, 101x101 e 201x201 células, consideradas suficientes para exemplificar os resultados de aplicação de filtros de diferentes dimensões. Na montagem de cada imagem foi sempre utilizado um mesmo operador para os três canais, pois o objetivo deste ensaio foi o de comparar as composições coloridas, e não cada canal em separado.

Após a aplicação dos filtros, os níveis de cinza foram re-escalados para a faixa de 0 a 255, tendo sido feito um aumento de contraste por equalização de histograma.

Para os filtros passa-altas, foram utilizados os mesmos experimentos que para os passa-baixas, entretanto as dimensões de operadores utilizadas foram menores (7x7, 15x15, 31x31 e 61x61). Estes filtros prestam-se ao realce de bordas, feições que são função de variações tonais locais, menos amplas do que as feições espectrais por elas limitadas. Assim, as dimensões dos operadores passa-altas foram necessariamente menores do que as dimensões dos passa-baixas utilizados no realce tonal.

5. Resultados obtidos e discussão

5.1 Testes quantitativos

Inicialmente foi testada a premissa de que uma imagem submetida a um filtro passa-altas de dimensões $n \times n$ deve excluir a informação tonal, a qual estará presente numa imagem filtrada por um filtro passa-baixas de iguais dimensões. Assim, a soma destas duas imagens filtradas

deve apresentar, idealmente, 100% de correlação com a imagem original. Numa análise quantitativa, essa premissa foi confirmada, observando-se uma alta correlação, até a terceira casa decimal, entre a imagem original e a soma das imagens filtradas.

A análise do grau de correlação que cada imagem gerada por filtragens passa-altas apresenta quando comparada à imagem original foi feita com a banda TM4. Como resultado, foram obtidos valores de correlação entre a imagem original e a imagem filtrada com operadores de 3x3 a 255x255 células, variando de 52,8% a 98,8%, respectivamente, segundo a curva apresentada na figura 2.

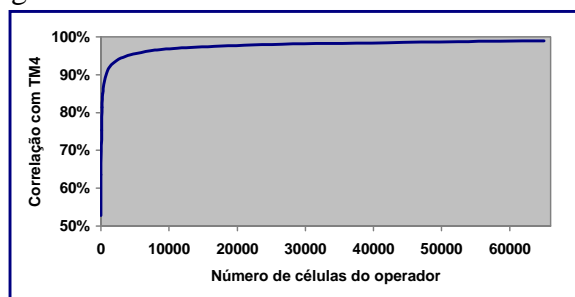


Figura 2: gráfico relacionando o número de células de operadores passa-altas e o grau de correlação entre a imagem filtrada e a imagem original.

Pode-se observar, portanto, que o grau de correlação aumenta rapidamente conforme aumentam as dimensões do operador, fato que, embora previsível, indica que os filtros não introduzem distorções significativas na imagem processada. Testes efetuados em outras imagens produziram curvas sempre com o mesmo padrão. No caso de filtragens passa-baixas, a curva comparativa do grau de correlação é oposta, pois a informação que é excluída em uma filtragem passa-altas é integralmente mantida na filtragem passa-baixas correspondente, e vice versa. Assim, a correlação entre uma imagem filtrada com filtro passa-baixas proporcional e a imagem original tende a diminuir com o aumento das dimensões do operador.

5.2 Testes qualitativos

Para este tipo de análise foi também utilizada a fotografia da chama de uma vela, a qual foi tratada com filtros passa-baixas e passa-altas, e os resultados submetidos a aumento de contraste por equalização de histograma para melhor visualização dos efeitos produzidos.

Para o estudo do comportamento dos filtros passa-baixas foram utilizados operadores de quatro dimensões diferentes. A **figura 3** mostra os resultados obtidos com a aplicação da metodologia descrita.

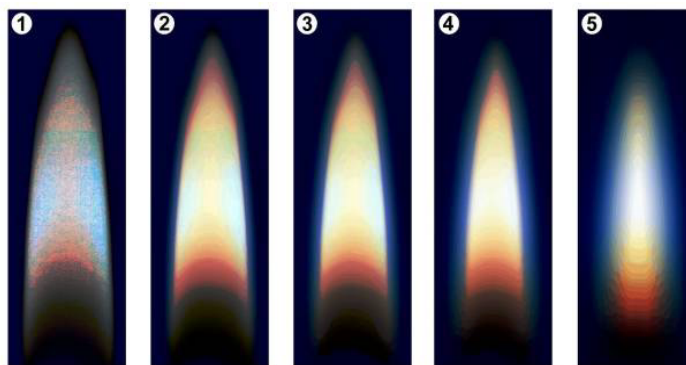


Figura 3: imagens da chama de uma vela com e sem a aplicação de filtro passa-baixas proporcional. Todas as imagens foram submetidas a um aumento de contraste por equalização de histograma, sendo a imagem (1) original e as demais filtradas com operadores de 45x45, 65x65, 101x101, 201x201 células, respectivamente.

Observa-se na **figura 3** que a porção basal da chama apresenta uma graduação de cores que vai desde o negro até o branco, passando por diversos tons de vermelho e amarelo. Ao comparar a imagem 1 com as imagens 2 e 3, nota-se que nas imagens filtradas a intensidade das cores é maior, o que indica que a informação tonal encontra-se mais realçada.

Na imagem 4 começa a ocorrer um forte efeito de “desfocagem” da imagem, devido às dimensões do operador utilizado, observando-se que, embora a informação tonal esteja realçada como nas imagens 2 e 3, as bordas perdem nitidez. Da mesma forma, a faixa amarela central da chama, presente de forma muito tênue na imagem 1 e realçada nas imagens 2 e 3, aparece atenuada na imagem 4.

A imagem 5 apresenta as feições internas e o contorno externo da chama visíveis, mas distorcidos a ponto de modificar significativamente suas formas. Isto se deve às dimensões excessivamente grandes do operador, fazendo com que, no cálculo de cada *pixel*, sejam incluídos muitos *pixels* do fundo, com os quais não apresenta nenhuma correlação. Isto pode ser observado no contorno inferior da chama, côncavo originalmente e convexo após a filtragem. Esta situação pode ocorrer em determinados casos de aplicação prática, onde existam feições de resposta homogênea e grandes dimensões em contraste com seu entorno (ex. lagos, solo exposto etc.).

Para os operadores passa-altas, são apresentadas as imagens obtidas por filtragens com 4 dimensões distintas. A **figura 4** mostra as imagens filtradas com operadores passa-altas com dimensões de 7x7, 15x15, 31x31 e 61x61 células (cf. **figura 3a** para comparação com a imagem original).

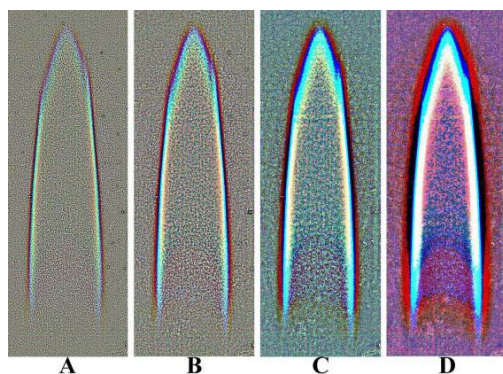


Figura 4: imagens da chama de uma vela com a aplicação de filtro passa-altas proporcional. As imagens foram filtradas com operadores de 7x7 (A), 15x15 (B), 31x31 (C) e 61x61 células (D), respectivamente, e submetidas a um aumento de contraste por equalização de histograma.

Na **figura 4**, a borda da chama está claramente delimitada nas quatro imagens expostas, com sua espessura variando proporcionalmente às dimensões do operador utilizado. Entretanto, as informações tonais originais do interior da chama são perdidas com a aplicação dos menores filtros passa-altas (imagens 4A e 4B). Dadas a resolução da imagem e as dimensões dos filtros, tais informações relacionam-se às baixas frequências de variação tonal. Quando aplicados operadores maiores, as feições tonais da base da chama aparecem nas imagens 4C e 4D. Este comportamento diferenciado deve-se ao fato de que tais feições possuem uma quantidade de *pixels* demasiadamente grande para o operador de 7x7 e de 15x15 células (consideradas de baixa frequência), estando no limite da sensibilidade do operador de 31x31 células. Já para o operador de 61x61 células, as bordas claramente representam feições de alta frequência.

6. Conclusões

Com base nos ensaios apresentados, pode-se afirmar que:

1. os filtros passa-baixas permitem a obtenção de realce das informações tonais de imagens de sensoriamento remoto;
2. os testes efetuados indicam que a arquitetura proposta para os operadores passa-altas e para os passa-baixas, está essencialmente correta, não gerando distorções significativas quando as dimensões do operador são adequadas às características da imagem;
3. a dimensão dos operadores, tanto passa-altas quanto passa-baixas, deve ser escolhida em função das dimensões das feições tonais, da textura e da resolução da imagem a ser estudada;

7. Referências bibliográficas

BLOM RG, DAILY M, 1982, Radar Image-Processing for Rock-Type Discrimination, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 20 (3), p. 343-351.

CURRAN, P. J. 1985. Principles of Remote Sensing. Longman Group Limited, London, U.K. 282p.

DRURY, S.A, 2001, Image Interpretation in Geology. Blackwell Science, UK, 3rd edition, 296p.

HOLDERMANN, F., BOHNER, M., BARGEL, B. AND KAZMIERCZAK, H., 1978, Review of Automatic Image Processing. Photogrammetria, 34, p. 225-258.

MATHER, P.M., 1999, Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction. John Wiley & Sons Inc., UK, 292p.

SOUZA FILHO, C. R., DRURY, S. A., DENNISS, A. M., CARLTON, R., ROTHERY, D. Restoration of Noise-Corrupted Optical Fuyo-1 (JERS-1) Data Using Frequency Domain Techniques. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Estados Unidos: , v.62, n.9, p.1037 – 1047.