

---

# RELATÓRIO TÉCNICO

## AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM PROCEDIMENTO DE EXTRAÇÃO DE ATRIBUTOS TEXTURAIS BASEADO EM ANÁLISE DE FOURIER

Emerson Prado Lopes  
Julio Salek Aude  
NCE/UFRJ

---

**NCE — 09/92**  
**setembro**



Núcleo de Computação Eletrônica  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Tel.: 598-3212 - Fax.: (021) 270-8554  
Caixa Postal 2324 - CEP 20001-970  
Rio de Janeiro - RJ

# Avaliação do desempenho de um procedimento de extração de atributos texturais baseado em Análise de Fourier

EMERSON PRADO LOPES<sup>1</sup>

JÚLIO SALEK AUDE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> NCE/UFRJ

Caixa Postal 2324

Rio de Janeiro - RJ - 20001

emerson@barra.nce.ufrj.br

<sup>2</sup> NCE/UFRJ

Caixa Postal 2324

Rio de Janeiro - RJ - 20001

salek@vidigal.nce.ufrj.br

**Abstract.** This paper presents a performance analysis of a Fourier-based textural feature extraction procedure. The textural classifications are based in the Euclidian distance method and are accomplished in two experiments. This analysis was done using a software called "Ambiente de Processamento de Sinais e Imagens - APSI" developed for this purpose.

## 1 Introdução

A automatização da classificação textural de imagens é uma tarefa de difícil execução e de grande interesse, particularmente, para imagens de conteúdo geológico. Para tanto, os métodos de classificação baseiam-se em atributos texturais os quais podem ser obtidos por procedimentos baseados em diferentes abordagens, tais como, Análise de Fourier [17], Estatística de primeira e segunda ordem [1], Morfologia Matemática [12] e técnicas de processamento espacial [15].

Neste trabalho é implementado e avaliado um procedimento de extração de atributos texturais baseado em Análise de Fourier. O procedimento busca a exploração das características espaciais da imagem com reflexo no domínio da frequência. A implementação do procedimento de extração de atributos texturais requer a utilização de ferramentas básicas de processamento de sinais e de imagens. A "Fast Fourier Transform" e sua inversa e filtros lineares elaborados no domínio da frequência e no domínio do espaço são as principais ferramentas utilizadas.

A classificação textural baseada nos atributos extraídos pelo procedimento adotado pode ser feita utilizando-se diversos métodos de classificação. Neste trabalho o método implementado foi o método da distância Euclidiana.

Para execução deste trabalho foi desenvolvido um sistema denominado Ambiente de Processamento de Sinais e Imagens - APSI desenvolvido em linguagem C em microcomputadores do tipo IBM-PC.

As heurísticas do procedimento em uma e duas dimensões são descritas na seção 2. Na seção seguinte é descrita a implementação do procedimento e as principais facilidades oferecidas pelo APSI. Na seção 4 são descritas as aplicações do procedimento a imagens com texturas consideradas de baixa complexidade. Uma descrição mais detalhada do conteúdo das seções citadas pode ser obtida em [10].

## 2 Procedimento de Extração de Atributos Texturais

As imagens de satélite de conteúdo geológico podem ser vistas como a composição de diferentes contribuições baseadas em fenomenologias diversas [7]. As leis de formação destas imagens podem ser por demais complexas, principalmente quando são incluídos fenômenos randômicos. No entanto, podem-se identificar algumas contribuições que geralmente estão presentes nestas imagens, como por exemplo, as decorrentes da reflectância das rochas e/ou plantas e da iluminação. As funções intensidades representativas destas componentes podem ser obtidas pela decomposição de imagens por técnicas de processamento de imagens já citadas ou por medições a parte. Um modelo simplificado do comportamento da variabilidade das tonalidades dos pixels de uma imagem pode ser considerado. Neste modelo, a função imagem é composta pelo produto de duas componentes: a função reflectância ( $f_r$ ) e a função iluminação ( $f_i$ ), ou seja,  $f_r \times f_i$ .

No caso particular do procedimento de extração

de atributos texturais adotado, é considerado que a imagem é composta de diversos componentes de frequência e que para cada um destes componentes a função imagem pode ser modelada como o produto de duas funções: a função modulação e a função modulada. A função modulação é um atributo textural e a função modulada é a efetiva variabilidade das tonalidades dos pixels relativa a uma dada banda de frequência. O procedimento objetiva extrair a função modulação. Esta função modulação pode ser de maior ou menor complexidade, dependendo do comportamento da variabilidade das tonalidades dos pixels na imagem para cada uma das componentes de frequência presentes.

O procedimento adotado de extração de atributos texturais é descrito nesta seção. Inicialmente é feita uma análise do procedimento para o caso de sinais em uma dimensão. As possibilidades de aplicação do procedimento em duas dimensões são analisadas a seguir.

## 2.1 Análise do Procedimento em Uma Dimensão

O procedimento a ser adotado para extração de atributos texturais de imagens segue a metodologia empregada na demodulação de sinais modulados em amplitude. Por este procedimento, os atributos texturais correspondem às funções modulação das componentes de frequência presentes na imagem. A análise deste método em uma dimensão, ou seja, para sinais compostos de frequências moduladas em amplitude, é realizada nesta seção. Considere:

$c(x) \rightarrow$  sinal de frequência  $\omega_0$  e período  $T_0 = 2/\omega_0$ .

$x \rightarrow$  a dimensão onde a função é definida.

A definição de  $c(x)$  pode ser a seguinte

$$c(x) = \cos(\omega_0 x) = 1/2 (e^{j\omega_0 x} + e^{-j\omega_0 x}).$$

A transformada de Fourier de  $c(x)$  é dada por:

$$C(\omega) = 1/2 [\gamma(\omega - \omega_0) + \gamma(\omega + \omega_0)]$$

O sinal  $d(x)$ , que representa a modulação em amplitude de  $c(x)$ , pode ser descrito como:

$$d(x) = m(x) c(x) = m(x) \cos(\omega_0 x),$$

onde  $m(x)$  é a função modulação que descreve a efetiva variação de amplitude de  $c(x)$ .

A transformada de Fourier de  $d(x)$  é

$$D(\omega) = M(\omega) * C(\omega),$$

onde  $*$  é a notação da operação de convolução. Pela propriedade de "shifting" da função delta,  $D(\omega)$  pode ser escrita como:

$$D(\omega) = M(\omega - \omega_0) + M(\omega + \omega_0)$$

O objetivo do procedimento é a extração da função modulação.

Portanto, seguindo um procedimento análogo ao da demodulação de sinais de amplitude modulada, os seguintes passos são necessários à execução do procedimento:

1. Geração do valor absoluto de  $d(x)$ , que acentua a diferença entre as frequências do sinal modulado,  $c(x)$ , e do sinal modulante  $m(x)$ , aumentando a frequência do sinal modulado;

2. Aplicação da transformada de Fourier sobre o valor absoluto de  $d(x)$ , de forma a se obter sua representação no domínio da frequência;

3. Filtragem passa-baixa, no domínio da frequência, do resultado do passo anterior;

4. Aplicação da transformada inversa de Fourier no resultado do passo anterior para obtenção do sinal de modulação,  $m(x)$ , que corresponde ao atributo textural.

Os passos do procedimento podem ser visualizados graficamente na Figura 2.1.

Nesta figura, o gráfico (a) representa o sinal modulado  $d(x)$  e o gráfico (b) sua transformada de Fourier.

O gráfico (c) representa o sinal modulante  $m(x)$ , sendo a transformada de Fourier de  $m(x)$  mostrada no gráfico (d).

O gráfico (e) mostra o valor absoluto de  $d(x)$ , cuja transformada de Fourier é apresentada no gráfico (f).

Finalmente, o gráfico (g) mostra o sinal modulante recuperado após filtragem passa-baixa do valor absoluto de  $d(x)$ .

No caso de haverem várias frequências moduladas em amplitude na composição do sinal, o primeiro passo do procedimento é antecedido por uma operação de filtragem que seleciona a banda de frequência a ser considerada, de forma semelhante ao que é realizado pelos circuitos de sintonia em rádio-receptores.

Para cada banda de frequência selecionada são, então, realizados os passos já descritos do procedimento, gerando-se, portanto, um atributo textural para cada frequência presente na composição do sinal.

## 2.2 Aplicação do Procedimento em Duas Dimensões

Embora seja possível se demonstrar teoricamente a validade do procedimento proposto na extração de funções de modulação em uma dimensão, tal fato não é verdadeiro para a aplicação do procedimento em duas dimensões. Ou seja, na extração de funções de modulação das componentes de frequência de uma imagem. A validade do procedimento, nestes casos, foi verificada através dos resultados práticos obtidos com sua aplicação em imagens compostas de texturas conhecidas [17].

O produto final do processamento em duas dimensões de interesse do intérprete da imagem é uma imagem classificada texturalmente, ou seja, uma imagem onde as regiões de diferentes texturas estejam discriminadas. Estas regiões se localizam em diferentes partes da imagem, possuem formas próprias e podem se orientar em diferentes direções. A aplicação do procedimento de extração de atributos de forma similar a descrita para o caso de uma dimensão e de um método de classificação permitem a geração deste produto final.

A transformada de Fourier de uma imagem explicita as frequências nela presentes, assim como suas fases e amplitudes. Com base na análise do resultado da aplicação da transformada de Fourier à imagem, são elaborados os filtros circulares passa-banda visando identificar a ênfase relativa das frequências das texturas presentes na imagem. No entanto, estes filtros nem sempre respondem satisfatoriamente a esta tarefa. Isto depende da complexidade da imagem no que se refere à variabilidade espacial dos tons de cinza, associado à dificuldade de se construir filtros com alta precisão de corte.

Considerando imagens de baixa complexidade, a transformada de Fourier explicita indubitavelmente as frequências presentes e contém a informação da distribuição espacial da ênfase em cada banda de frequência. Texturas de baixa complexidade podem ser vistas como as que possuem simetria circular e aquelas em que as relações entre as tonalidades dos pixels podem ser descritas por funções periódicas, mais particularmente pelo somatório de um pequeno conjunto de funções senoidais de mesma fase e com frequências razoavelmente bem espaçadas entre si. Filtros passa-banda elaborados para este caso não precisam ter superposição de bandas e a fuga é praticamente inexistente, pois a separação das frequências das componentes é grande o suficiente.

A ênfase relativa entre as frequências presentes em cada textura é o principal fator que permite a discriminação das texturas. Para uma imagem mais complexa, as componentes de frequência não são ne-

cessariamente separadas, o que requer a escolha de uma componente dentro de cada banda de frequência, chamada de componente chave ou dominante. Esta componente é obtida através de uma estimação.

A textura é o resultado da composição de diferentes componentes de frequência com determinadas amplitudes e diferenças de fases. Podem-se distinguir na textura duas partes distintas. Uma delas contém o espectro das frequências presentes na textura. A outra parte contém a variabilidade da amplitude e da diferença de fase da textura. Considerando que as diferenças de fase são nulas ou estão englobadas na variabilidade da intensidade, pode-se considerar que a textura é resultado do produto entre as componentes de frequência de amplitude constante ou igual a unidade (portadora) e uma função modulação característica da textura. Sendo assim, recuperando-se esta função da imagem tem-se um atributo textural. O segundo e terceiro passos do procedimento fazem esta recuperação. O segundo passo calcula o valor absoluto de cada imagem resultado das filtrações passa-banda.

O terceiro passo é a aplicação de um filtro circular passa-baixa capaz de isolar as frequências da função modulação. A função modulação possui componentes cujas frequências são baixas se comparadas com as frequências presentes na função modulada. Tal fato é ainda mais acentuado após a realização da operação de valor absoluto. O atributo textural é finalmente extraído, fazendo-se a transformada inversa de Fourier do resultado gerado pela filtragem passa-baixa.

## 3 Implementação do Procedimento.

O sistema APSI foi desenvolvido para operacionalizar a execução do procedimento. O sistema APSI possui uma organização hierárquica, onde podem-se distinguir quatro ramos principais a partir de seu nível mais alto:

1. Manipulação de sinais.
2. Manipulação de imagens.
3. Transformação de funções e imagens.
4. Classificação de imagens

A manipulação de sinais visa editar, corrigir, recuperar, gerar e realizar operações com sinais e a manipulação de imagens visa o mesmo para imagens. O ramo 3, possibilita a execução dos algoritmos de transformações (FFT e FFT inversa), filtrações (FFT - convolução), correlação e cross-correlação. No ramo de classificação de imagens, o usuário pode gerar uma nova assinatura para o banco de textu-

ras padrões ou realizar a classificação textural pelo método da distância Euclidiana de uma imagem da qual os atributos texturais já foram extraídos. O menu principal do sistema apresenta essas quatro alternativas de processamento.

No que se refere à entrada e saída de dados, o sistema APSI oferece as seguintes facilidades:

1. Entrada de Dados: Recuperação de arquivos de dados e imagem em disco, armazenando-os em áreas da memória principal devidamente alocadas para posterior processamento.

2. Saída de Dados: "Display" do conteúdo de áreas alocadas da memória principal (imagens), e de vetores (sinais) na forma de listagem ou gráfica; Armazenamento de dados de sinais ou imagens em arquivos; Saída de arquivos de dados ou imagens, processados ou não, na impressora.

## 4 Descrição das Aplicações

### 4.1 Aplicação 1

Nesta aplicação a imagem é composta por três diferentes texturas distribuídas nos quadrantes da imagem na seguinte ordem: 1,2,3,1 como está mostrado na figura 4.1. Estas texturas são compostas pela soma de duas parcelas cada uma delas compostas pelo produto de três componentes: uma constante (amplitude), uma função Gaussiana e uma função cosseno. Nestas texturas as funções cossenos somente diferem em frequência e as funções Gaussianas são idênticas e possuem constantes de decaimento relativamente baixas. Além disso apresentam simetria circular. Desta forma, estas texturas são consideradas de baixa complexidade.

$$\text{TEXTURA 1} = 200 \times \text{Gaussiana} \times \cos 0.3 + 500 \times \text{Gaussiana} \times \cos 0.5$$

$$\text{TEXTURA 2} = 500 \times \text{Gaussiana} \times \cos 0.3 + 200 \times \text{Gaussiana} \times \cos 0.5$$

$$\text{TEXTURA 3} = 500 \times \text{Gaussiana} \times \cos 0.3 + 500 \times \text{Gaussiana} \times \cos 0.5$$

A imagem é de tamanho 256x256 pixels sendo que cada textura ocupa uma região de 64x64 pixels.

Nesta aplicação, as texturas se diferenciam pela variação das amplitudes que multiplicam cada componente de cada textura. Esta variabilidade pode ser observada nas transformadas de Fourier de cada uma das texturas mostradas nas figuras 4.2, 4.3, 4.4.

Baseado nas transformadas de Fourier da imagem foram definidos os filtros passa-banda que deixam passar frequências angulares 0.3 e 0.5, respectivamente. Neste caso, são criados dois ramos nos quais são realizados os passos seguintes do procedi-

mento, o valor absoluto e a filtragem passa-baixa. Como resultado são obtidas duas imagens atributos as quais correspondem as funções modulação de cada componente de frequência presente na imagem. As figuras 4.5 e 4.6 mostram estas imagens.

Sabendo-se que as assinaturas padrões das texturas presentes na imagem já estão em um banco de assinaturas, pode-se classificar a imagem colocando as imagens atributos como entrada do classificador pixel a pixel implementado no sistema APSI. O resultado desta classificação, que apresentou regiões de erro nas bordas dos quadrantes, é mostrado na figura 4.7.

Os erros ocorridos nas bordas dos quadrantes são atribuídos a um rápido decaimento das funções Gaussianas e/ou a dificuldade da recuperação da função Gaussiana decorrente de sua não-linearidade.

### 4.2 Aplicação 2

A imagem utilizada nesta aplicação foi a mesma imagem da aplicação 1 substituindo-se a textura 3 do terceiro quadrante por uma textura 4 com as seguintes características:

$$\text{TEXTURA 4} = 500 \times \text{gaussiana} \times \cos 0.3 + 500 \times \text{gaussiana} \times \cos 0.5$$

A imagem utilizada nesta aplicação está mostrada na figura 4.8. A textura 4 difere da textura 3 pelo fato de que as constantes de decaimento das duas Gaussianas presentes na textura são diferentes. Isto gera uma variabilidade significativa nas assinaturas pixel a pixel geradas para esta textura e consequentemente uma distorção de sua assinatura padrão.

O procedimento é aplicado à imagem e são obtidas duas imagens atributos mostrados nas figuras 4.9 e 4.10. O resultado da classificação mostrado na figura 4.11 apresentou um erro no quadrante 3, onde a textura classificada foi a textura 2 no lugar da textura 4.

## 5 Conclusões

Apesar de os resultados obtidos para imagens de baixa complexidade na aplicação 1 terem sido satisfatórios, algumas limitações do procedimento e alguns passos críticos que, se melhorados, podem aumentar a robustez do procedimento foram observados.

A limitação mais importante observada, mostrada na aplicação 2, é o fato de o procedimento requerer, para um desempenho satisfatório, que cada textura presente na imagem possa ser descrita por uma composição de ondas senoidais moduladas por funções que possuam formas semelhantes, de modo que as assinaturas formadas a partir das imagens a-

tributos não apresentem grandes variações ao longo da imagem. Esta restrição implica em que as texturas devam ter suas funções de modulação se desenvolvendo direcionalmente da mesma forma para todas as frequências, como por exemplo ocorre em imagens com simetria circular. Mesmo com esta restrição, uma variação significativa das assinaturas pode ocorrer se as funções de modulação forem acen-tuadamente não lineares.

Um dos passos mais críticos do procedimento é a seleção da largura dos filtros a serem utilizados. Uma alta variação das assinaturas texturais dos pixels ao longo da imagem pode resultar de uma operação de filtragem inadequada. Além do cuidado na seleção da largura do filtro, será interessante investigar com mais detalhe a eficácia da utilização de filtros capazes de recuperar mais fielmente as funções de modulação, tendo em vista a não linearidade das funções que descrevem formas de onda senoidais moduladas em amplitude. Neste tópico, especial atenção deve ser dada à avaliação do desempenho de filtros homomórficos e à utilização de funções de peso.

Um outro aspecto observado durante os testes do procedimento é o impacto que causa a redução das dimensões da imagem sobre a resolução que se consegue obter no domínio da frequência para uma definição adequada do filtro a ser empregado. Devido a este problema, foi necessário se modificar a implementação do sistema APSI, de modo a torná-lo capaz de operar com a memória expandida dos micros IBM-PC e, conseqüentemente, poder trabalhar com imagens de dimensões iguais ou superiores a 256 x 256. Somente, com o uso destas imagens foi possível se ter êxito na separação das frequências mínima (aquela que possui pelo menos dois ciclos dentro da imagem) e máxima (aquela que possui pelo menos 10 amostragens por período) utilizáveis na imagem.

Na área de classificação será conveniente investigar a aplicabilidade de redes neuronais [9][13]. O uso desta técnica pode reduzir a sensibilidade do classificador às variações das assinaturas dos pixels decorrentes de não linearidades ou leves discrepâncias de forma nas funções de modulação.

Finalmente, resta completar a avaliação do procedimento através de sua aplicação a uma imagem real com conteúdo geológico. Nesta situação, a complexidade natural da imagem exigirá que certamente tenham sido feitos progressos com relação ao processo de filtragem e à robustez do classificador.

## Referências

- [1] Braga, L.P.V., "Geoestatística e Aplicações", Publicação do 9o. Simpósio Brasileiro de Probabilidade e Estatística, IME-USP, 1990
- [2] Brigham, E. O., "The Fast Fourier Transform and its Applications", Prentice-Hall Signal Processing Series, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988
- [3] Cooley, J.W., Lewis, P.A., Welch, P.D., "The Finite Fourier Transform", IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, Vol. AU-17, No.2, Junho 1969, pp. 77-85
- [4] Dutra, L.V., Classificação de Texturas Usando Modelos ARMA e Distâncias da Função de Autocorrelação", Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Espaciais, Relatório Técnico No. INPE-5067-TDL/406, Abril 1990
- [5] Haralick, R.M., Shanmugan, K., Dinstein, I., "Textural Features for Image Classification", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-3, No.6, Novembro 1973, pp. 610-621
- [6] Haralick, R. M., "Statistical and Structural Approaches to Texture", Proceedings of the IEEE, Vol. 67, No. 5, Maio 1979, pp. 786-804
- [7] Haralick, R.M., Campbell, J.B., Wang, S., "Automatic Inference of Elevation and Drainage Models from Satellite Image", Proceedings of the IEEE, Vol. 73, No.6, Junho 1985, pp. 1040-1053
- [8] Hawkins, J.K., "Textural Properties for Pattern Recognition", Picture Processing and Psychopictorics, Bernic Sacks Lipkin and Azriel Rosenfeld (Editores), Academic Press, New York, 1969
- [9] Heermann, P.D., Khazenie, N., "Classification of Multispectral Remote Sensing Data Using a Back-Propagation Neural Network", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Processing, Vol. 30, No. 1, Janeiro 1992, pp. 81-88
- [10] Lopes, E.P., Aplicação de Técnicas no Domínio da Frequência ao Problema de Análise Textural de Imagens. Tese de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Computação da COPPE/UFRJ, Maio de 1992.
- [11] Lim, J.S., "Two-Dimensional Signal and Image Processing", Prentice-Hall International Editions, Englewood Cliffs, New Jersey, 1990

- [12] Maragos, P., "Tutorial on Advances in Morphological Image Processing and Analysis", Optical Engineering, Vol. 26, No. 7, Julho 1987, pp. 623-632
- [13] McCormack M.D., "Neural Computing in Geophysics", Geophysics: The Leading Edge of Exploration", Janeiro de 1991, pp. 11-15
- [14] Novo, E.M.L.M., "Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações", INPE-SRE/COT/DPA, São José dos Campos, SP, 1988.
- [15] Paradella, W.R., "Introdução ao Processamento Digital de Imagens de Sensores Remotos Aplicado à Geologia", Relatório Técnico do Instituto de Pesquisas Espaciais, INPE-5023-RPE/616, São José dos Campos, SP, 1990
- [16] Pike, R.J., Rozema, W.J., "Spectral analysis of landforms", Ann. Assoc. Amer. Geog., vol. 65, pp. 499-516, 1975.
- [17] Stromberg, W.D., Farr, T.G., "A Fourier-Based Textural Feature Extraction Procedure", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. GE-24, No.5, Setembro 1986, pp. 722-731
- [18] Swain, P.H., Davis, S.M., "Remote Sensing: The Quantitative Approach", Purdue University, West Lafayette, Ind., U.S.A., McGraw-Hill International Book Company.

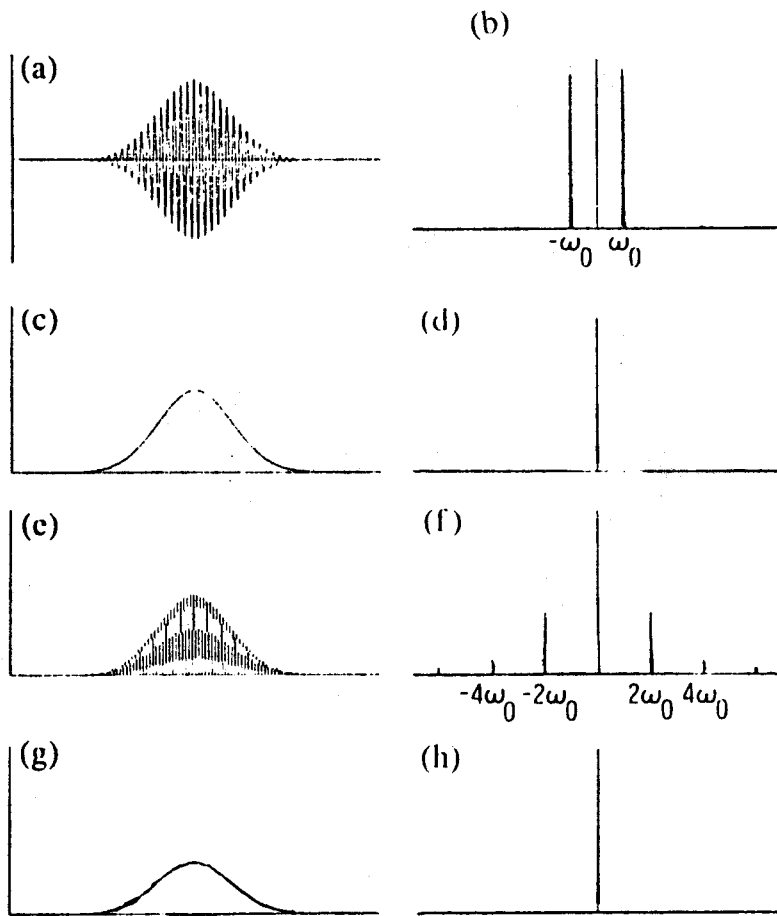


Figura 2.1. Demonstração do procedimento de extração de atributos texturais em uma dimensão.

- (a) cossenoide modulada.
- (b) magnitude de sua transformada.
- (c) modulação original de (a).
- (d) transformada de (c).
- (e) valor absoluto de (a).
- (f) transformada de (e).
- (g) resultado da filtragem passa-baixa de (f).
- (h) transformada inversa de Fourier - atributo textural.



## IMAGEM COMPOSIÇÃO

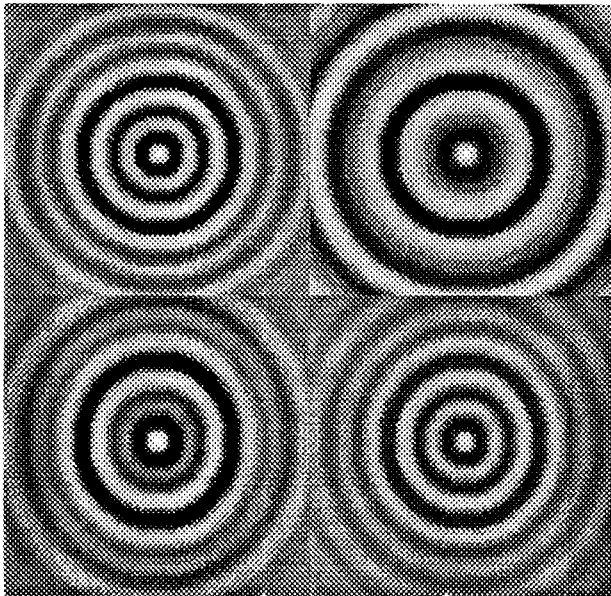


Figura 4.1

Texturas 1, 2, 3, 1  
APLICAÇÃO 1



Aplicação 1 : ATRIBUTO #1

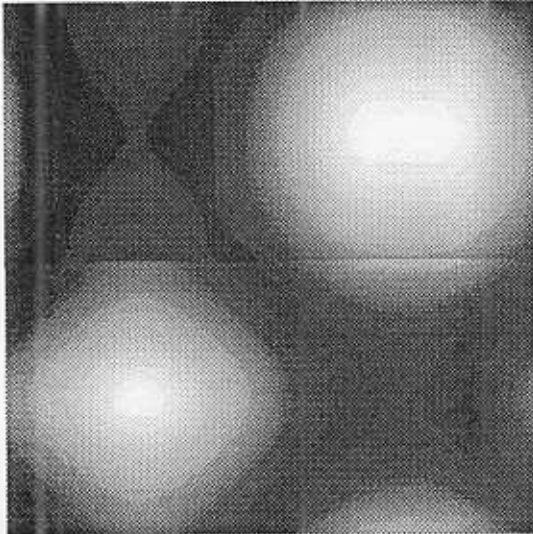


Figura 4.5

Aplicação 1 : ATRIBUTO #2

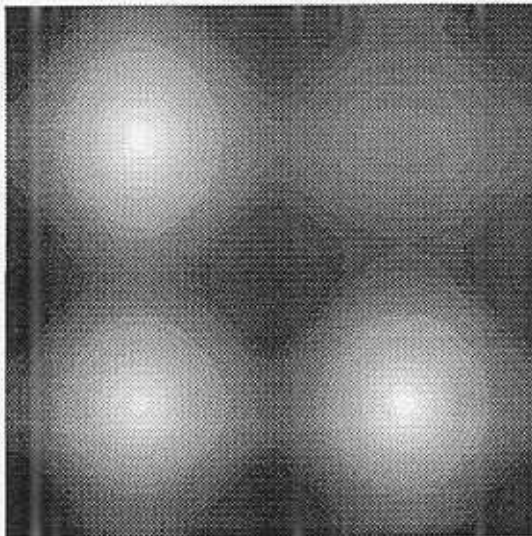


Figura 4.6

CLASSIFICAÇÃO APLICAÇÃO 1

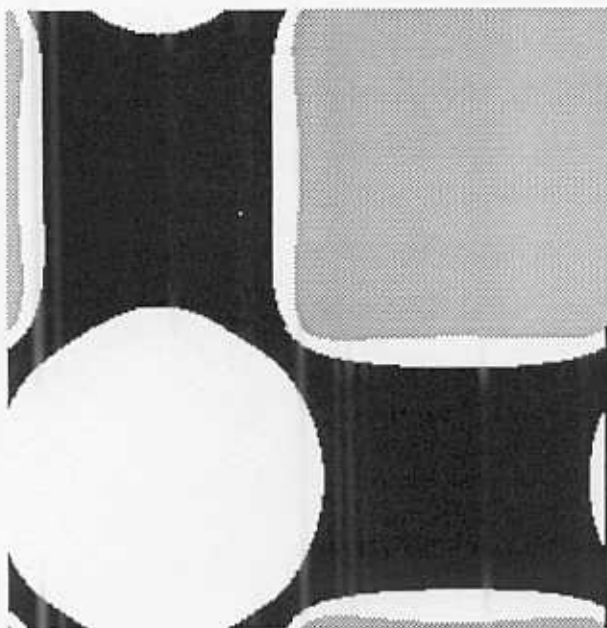


Figura 4.7

dist. Euclidiana = 0.5

preto - textura 1

cinza - textura 2

branco - textura 3

IMAGEM COMPOSIÇÃO

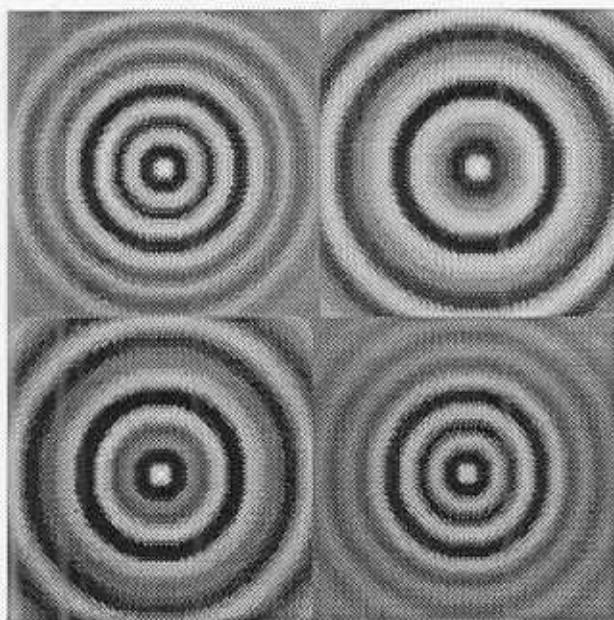


Figura 4.8

Texturas 1, 2, 4, 1

APLICAÇÃO 2

Aplicação 2 : ATRIBUTO #1

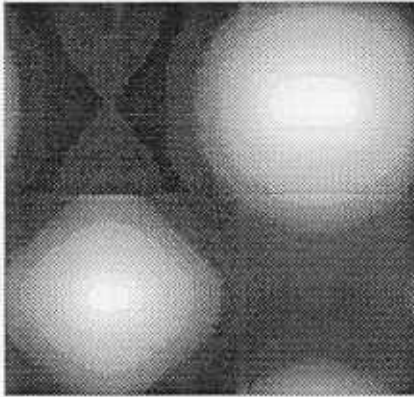


Figura 4.9

Aplicação 2 : ATRIBUTO #2

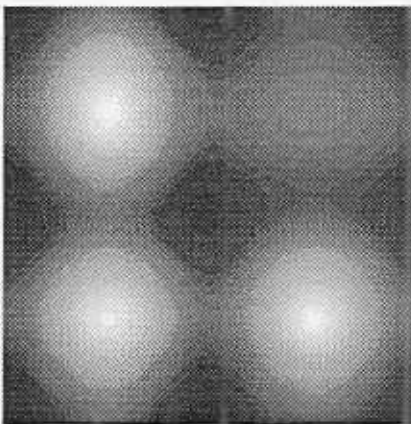


Figura 4.10

CLASSIFICAÇÃO APLICAÇÃO 2



Figura 4.11

dist. Euclidiana = 0.5

preto - textura 1

branco - textura 2