

Classificação não-supervisionada de imagens SAR polarimétricas utilizando os parâmetros polarimétricos $H-\alpha-A$ e uma variante da matriz de Müller

Naiallen Carolyne Rodrigues Lima Carvalho

David Fernandes

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) - DCTA

Praça Eduardo Marechal Gomes, 50, CEP 12228-900, São José dos Campos, SP, Brasil

naiallen@yahoo.com.br, david@ita.br

Abstract. This paper describes the development of the unsupervised classification algorithms using polarimetric synthetic aperture radar (SAR) images. For this purpose, the technique used to the classification at this work was divided in two parts. On the first part the SAR images was previously classified using the polarimetric parameters Entropy-Alpha-Anisotropy, and as results of this classification, the classes used on second part of this work were determined. Afterwards, the image classification was done by the distance and by the Person correlation coefficient applied to the Müller variant Matrix $[W_i]$ related to the pixel to be classified and the classes Matrixes $[W_m]$. For comparison was also implemented the Maximum Likelihood classification method that consider the Wishart distribution for the coherence matrix $[T_i]$ of the pixel to be classified and the $[T_m]$ classes coherence matrixes. The comparison among the three methods was made by the classification of an E-SAR (DLR) polarimetric image, previously classified by the parameters Entropy-Alpha-Anisotropy in four, eight and sixteen classes. The analysis results is based on a discrete multivariate technique used to accuracy assessment called Kappa, which indicates the good performance of the proposed method.

Palavras-chave: unsupervised classification, SAR polarimetric images, SAR image classification, Wishart distribution, classificação não-supervisionada, imagens SAR polarimétricas, classificação de imagens SAR, distribuição Wishart

1. Introdução

Os sistemas imageadores que utilizam Radar de Abertura Sintética (SAR) atuam, em grande parte, na faixa de microondas, o que o faz uma importante ferramenta na análise de áreas do solo, sobressaindo-se às imagens óticas no que diz respeito à independência da luz solar, fatores climáticos e nuvens, entre outros. Além de permitir uma penetração mais acentuada da cobertura vegetal, dependendo da banda de frequência utilizada.

As imagens SAR podem ser geradas por sistemas com uma única polarização e uma única banda de frequência ou por sistemas mais complexos que empregam múltiplas bandas e múltiplas polarizações, permitindo assim uma melhor classificação ou segmentação da área observada.

O uso de imagens SAR polarimétricas possibilita, para a frequência de operação, a obtenção da matriz de espalhamento $[S]$ das diversas classes de alvos que compõe uma cena. Esta matriz de espalhamento é a base para vários métodos de classificação polarimétricos (Cloude e Pottier 1996, 1997; Hellmann, 2000 e Villaça, 2008).

Ouarzeddine et al. (2007) propuseram um método de classificação não-supervisionado que utiliza conjuntamente os parâmetros polarimétricos $H-\alpha-A$ (entropia, ângulo alfa e anisotropia) e o critério da Máxima Verossimilhança considerando a Distribuição Wishart para a matriz de coerência $[T]$ representativa das diversas possíveis classes em uma imagem SAR polarimétrica.

Neste trabalho propõe-se um método de classificação não supervisionada que utiliza conjuntamente os parâmetros polarimétricos $H-\alpha-A$ com a Distância (DT) e o Coeficiente de Correlação de Pearson (CC), aplicados a Matriz $[W]$ representativa das diversas possíveis classes em uma imagem SAR polarimétrica. A Matriz $[W]$, variante da Matriz de Müller, é utilizada no cálculo da resposta polarimétrica de alvos presentes nas imagens SAR polarimétricas (Villaça, 2008 e Villaça e Fernandes 2009).

O trabalho realizado está estruturado do seguinte modo: no Capítulo 2 apresenta-se o cálculo dos parâmetros polarimétricos H - α - A e da matriz $[W]$. No Capítulo 3 descreve-se o método de classificação proposto e os utilizados para comparações. No Capítulo 4 são mostrados os resultados obtidos na classificação de uma imagem SAR polarimétrica e no Capítulo 5 fazem-se os comentários finais a respeito do trabalho realizado.

2. Decomposição Polarimétrica

A matriz complexa de espalhamento $[S]$, relativa a cada pixel de uma imagem SAR polarimétrica é dada por (Villaça, 2008):

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \quad (1)$$

em que S_{xy} , com $x, y \in \{h, v\}$, é a amplitude complexa de espalhamento, considerando-se uma transmissão com polarização y e uma recepção com polarização x . O índice h indica a polarização horizontal e v indica a polarização vertical.

Se for considerado válido o teorema da reciprocidade, (sistema SAR calibrado e alvos isotrópicos e a não existência de rotação de Faraday) pode-se considerar que as componentes de espalhamento cruzadas são equivalentes, isto é, $S_{vh} = S_{hv}$.

A representação de $[S]$ na forma do vetor de Pauli é dada por (Cloude e Pottier, 1997):

$$\vec{K}_{p3} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{hh} + S_{vv} \\ S_{hh} - S_{vv} \\ 2S_{vh} \end{bmatrix} \quad (2)$$

A partir desse vetor é definida a Matriz de Coerência Polarimétrica dada por (Villaça, 2008):

$$[T] = \langle \vec{K}_{p3} \vec{K}_{p3}^H \rangle \quad (3)$$

sendo o termo sobre-escrito H indica o operador hermitiano (transposto e conjugado), e $\langle . \rangle$ indica a média, usualmente estimada pela média amostral de uma vizinhança do pixel considerado, contendo L amostras.

Com os autovalores ordenados de $[T]$, representados por $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$, e os correspondentes auto vetores são calculados os parâmetros polarimétricos Entropia (H), Anisotropia (A) e Ângulo Alfa (α), dados respectivamente por (Cloude e Pottier, 1997):

$$H = \sum_{i=1}^3 (-p_i \cdot \log_3 p_i) \quad \text{onde} \quad p_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad (4)$$

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad (5)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^3 (-p_i \cos^{-1}(k_{xi})) \quad (6)$$

sendo k_{xi} é o primeiro elemento do auto-vetor associado ao autovalor λ_i .

A Entropia ($0 \leq H \leq 1$) tem a finalidade de indicar aleatoriedade do espalhamento e a Anisotropia indica a contribuição de espalhadores secundários e tem seu uso mais eficiente para os caso regiões com baixos valores de entropia (Kraus e Fernandes, 2007).

O ângulo alfa é um indicador do tipo de mecanismo de espalhamento (superfície isotrópica, dipolo, diedros, etc.) (Correia, 2009).

Define-se ainda a matriz $[W]$, que é uma variação a matriz de *Müller*, que tem como elementos o valor médio de todos os produtos escalares dos elementos da matriz de Espalhamento $[S]$, como (Villaça, 2008):

$$[W] = [W_{i,j}]_{i,j=0,1,2,3} = \begin{bmatrix} \langle S_{hh}S_{hh}^* \rangle & \langle S_{hv}S_{vh}^* \rangle & \langle S_{hh}S_{hv}^* \rangle & \langle S_{hv}S_{hh}^* \rangle \\ \langle S_{vh}S_{vh}^* \rangle & \langle S_{vv}S_{vv}^* \rangle & \langle S_{vh}S_{vv}^* \rangle & \langle S_{vv}S_{vh}^* \rangle \\ \langle S_{hh}S_{vh}^* \rangle & \langle S_{hv}S_{vv}^* \rangle & \langle S_{hh}S_{vv}^* \rangle & \langle S_{hv}S_{vh}^* \rangle \\ \langle S_{vh}S_{hh}^* \rangle & \langle S_{vv}S_{hv}^* \rangle & \langle S_{vh}S_{hv}^* \rangle & \langle S_{vv}S_{hh}^* \rangle \end{bmatrix} \quad (7)$$

em que * indica complexo conjugado e $W_{i,j}$ é um elemento da matriz $[W]$. Se os elementos da matriz $[W]$ forem relativos a uma classe ω_m essa matriz será representada como $[W_m] = [W_{i,j|\omega_m}]_{i,j=0,1,2,3}$.

3. Métodos de Classificação

A classificação das imagens analisada neste trabalho aconteceu em duas fases, a primeira foi chamada de pré-classificação e a segunda é a classificação propriamente dita.

A Pré-classificação tem o objetivo de identificar as classes ω_m , requeridas nos processos de classificação descritos no decorrer desta seção. Para isso, foi utilizado o método de classificação proposto por Cloude e Pottier (1997) que utiliza os parâmetros H - α como mostrado na Figura 1, para uma classificação automática em nove classes de Z_1 a Z_9 . A classificação utiliza efetivamente oito zonas (a zona Z_3 não é utilizada) internas que são delimitadas pelas curvas I e II, representadas na Figura 1, calculadas por (Hellmann, 2000):

$$H_I(m) = \frac{1}{(1+2m)} \log_3 \left(\frac{m^{2m}}{(1+2m)^{2m+1}} \right), \quad H_{II}(m) = \frac{1}{(1+2m)} \log_3 \left(\frac{(2m-1)^{2m-1}}{(1+2m)^{2m+1}} \right) \quad (8)$$

$$\alpha_I(m) = \frac{m\pi}{1+2m}, \quad \alpha_{II}(m) = \begin{cases} \pi/2 \\ \pi/1 + 2m \end{cases} \quad (9)$$

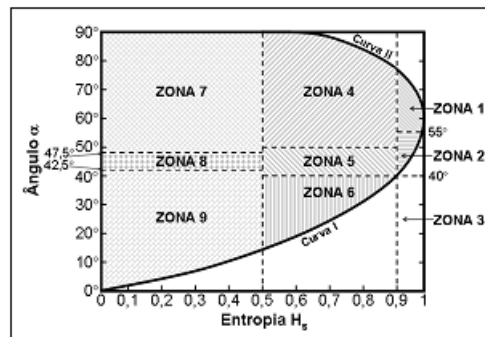


Figura 1: Nove Regiões do Plano H- α . Fonte: Correia (2009).

Utilizando-se ainda o plano H- α pode-se fazer a classificação em quatro classes juntando-se as zonas 1, 2 e 4 para gerar a classe 1, depois juntado-se as zonas 5, 8 e 9, é gerada a classe 2, em seguida a zona 6 gera a classe 3 e por fim a zona 7 gera a classe 4 (Cloude e Pottier, 1997). Para a classificação de quatro zonas têm-se as seguintes classes: 1. Regiões de floresta e/ou áreas vegetadas mais densas; 2. Gramado; 3. Pistas e/ou solo exposto; 4. Área urbana.

Uma classificação mais completa em 16 classes é obtida considerando-se H - α - A com as oito regiões efetivas em conjunto com a informação da anisotropia (A) acima e abaixo do valor 0,5. Dessa forma as 16 zonas de classificação são: oito zonas para $A < 0,5$ e mais oito zonas para $A \geq 0,5$. A Zona 1 corresponde a regiões de vegetação com galhos e copa bem desenvolvidos, a Zona 2 representa as regiões espalhamento da vegetação com alta entropia, enquanto a Zona 4 representa regiões de vegetação em área urbana, a Zona 5 retrata as regiões de superfícies vegetadas, a Zona 6 representa pistas e/ou solo exposto, a Zona 7 representa regiões urbanas, a Zona 8 representa regiões vegetação com elementos de espalhamento

anisotrópicos altamente correlacionados e, por fim, a Zona 9 contém regiões de superfícies bem suaves.

A segunda parte do trabalho consiste em realizar a classificação a partir das classes ω_m definidas na primeira etapa. Foram utilizados três classificadores, que são descritos no decorrer da seção.

O primeiro método utilizado, para comparar com o método proposto, é baseado na Distribuição Wishart da Matriz de Coerência $[T_i]$ relativa a um pixel, dada a classe ω_m presente na imagem SAR polarimétrica. Essa distribuição é definida como (Lee e Grunes, 1992):

$$w([T_i] | \omega_m) = L^{3L} |[T_i]| \exp\{-tr(L[\Sigma_m]^{-1}[T_i])\} / (K(L, 3) |[\Sigma_m]|^L) \quad (10)$$

em que $|\cdot|$ indica o determinante, $[\Sigma_m]$ é a média condicional de $[T]$:

$$[\Sigma_m] = E([T_i] | [T_i] \in \omega_m) \quad (11)$$

e

$$K(L, 3) = \pi^3 \prod_{i=1}^3 \Gamma(L - i + 1) \quad (12)$$

sendo L é o número de amostras da vizinhança usada no cálculo da matriz $[T_i]$ e $tr(\cdot)$ é operador traço.

Para a classificação, pelo método da Verossimilhança, deve-se realizar o seguinte teste Lee e Grunes (1992):

$$[T_i] \in \omega_m \Leftrightarrow d([T_i], [\Sigma_m]) \leq d([T_i], [\Sigma_n]), \quad \omega_m \neq \omega_n \quad (13)$$

sendo

$$d([T_i], [\Sigma_m]) = \ln|[\Sigma_m]| + tr([\Sigma_m]^{-1}[T_i]) \quad (14)$$

Assim o primeiro classificador utiliza a proposta de Ouarzeddine et al. (2007), em que inicialmente a classificação utiliza os parâmetros $H-\alpha-A$ para estimar as classes nas quais são calculadas as matrizes $[\Sigma_m]$ que serão utilizadas no processo de classificação descrito pela Equação (13), tornando assim o processo de classificação automático e não supervisionado.

O segundo e terceiro método de classificação, proposto por este trabalho, utiliza a matriz $[W_m]$, de cada classe do espaço $H-\alpha-A$, para o cálculo da Distância (DT) e do Coeficiente de Correlação de Pearson (CC) entre esta matriz e a matriz $[W_i]$ correspondente a um pixel da imagem polarimétrica.

O Cálculo de DT é realizado do seguinte modo:

$$DT([W_i], [W_m]) = \sqrt{\sum_{i,j=0,1,2,3} (W_{i,j} - W_{i,j|\omega_m})^2} \quad (15)$$

E a classificação é dada pela condição:

$$[W_i] \in \omega_m \Leftrightarrow DT([W_i], [W_m]) \leq DT([W_i], [W_n]), \quad \omega_m \neq \omega_n \quad (16)$$

O cálculo de CC é realizado do seguinte modo:

$$CC([W_i], [W_m]) = \sum_{i,j=1,2,3} (W_{i,j} - \overline{[W_i]}) \cdot (W_{i,j|\omega_m} - \overline{[W_m]}) / \sqrt{VAR(W_{i,j}) \cdot VAR(W_{i,j|\omega_m})} \quad (17)$$

$$CVAR(W_{i,j}) = \sum_{i,j=1,2,3} (W_{i,j} - \overline{[W_i]})^2 \quad (18)$$

$$VAR(W_{i,j|\omega_m}) = \sum_{i,j=1,2,3} (W_{i,j|\omega_m} - \overline{[W_m]})^2 \quad (19)$$

em que $\overline{[W_i]}$ representa a média dos elementos em $[W_i]$, e $\overline{[W_m]}$ representa a média dos elementos em $[W_m]$.

E a classificação é dada pela condição:

$$[W_i] \in \omega_m \Leftrightarrow CC([W_i], [W_m]) \geq CC([W_i], [W_n]), \quad \omega_m \neq \omega_n \quad (20)$$

4. Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados da metodologia de classificações empregadas. Para isso foram utilizadas imagens polarimétricas (4000 x 1580 pixels) na banda L, do sistema aerotransportado ESAR do DLR/HF (German Aerospace Center – Microwave and Radar Institute). A cena imageada é de Oberpfaffenhofen/Gilching na Baviera, sul da Alemanha e é apresentada nas Figuras 2.a, 2.b e 2.c.

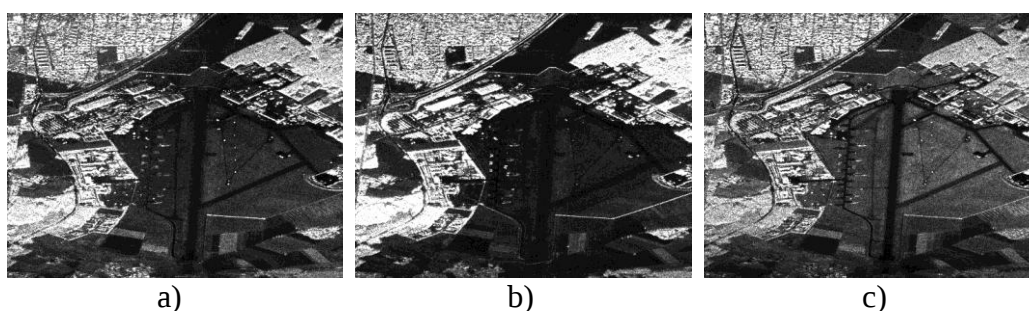


Figura 2. a) Imagem Polarimétrica SHH. b) Imagem Polarimétrica SHV. c) Imagem Polarimétrica SVV

A partir dessas três imagens é calculada para cada pixel a matriz $[S]$ e os demais parâmetros necessários à classificação, em seguida é realizada a classificação utilizando-se o plano $H-\alpha$ e o espaço $H-\alpha-A$, mostradas nas Figuras 3a e 3b. É importante destacar que o espaço $H-\alpha-A$ tem 16 zonas de classificação possíveis, no entanto, para as imagens analisadas neste trabalho, as zonas 1 e 2 para anisotropia maior que 0,5 não tiveram pixels classificados, sendo suprimidas do restante da classificação.

Para as duas classificações calculou-se o coeficiente Kappa (Figueiredo e Vieira, 2007) obtendo-se: Classificação $H-\alpha$ (oito classes) $\rightarrow$ Kappa de 96,65%, classificação $H-\alpha-A$ (16 clases) $\rightarrow$ Kappa de 90,99%.

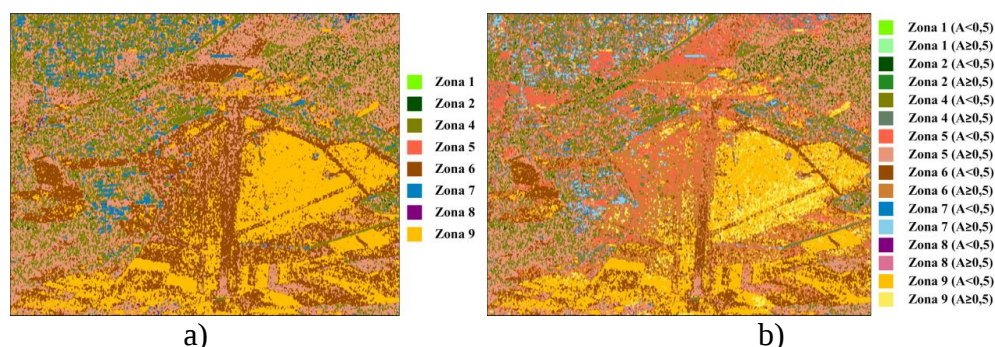


Figura 3. a) Classificação $H-\alpha$, b) Classificação $H-\alpha-A$.

A partir das pré-classificações $H-\alpha$ (4 classes), $H-\alpha$ (oito classes) e $H-\alpha-A$ (16 classes) fez-se a classificação utilizando-se as Equações (13), (16) e (20). As Figuras 4a, 4b e 4c mostram a classificação para quatro classes, as Figuras 5a, 5b e 5c mostram a classificação para oito classes e as Figuras 6a, 6b e 6c mostram a classificação para catorze classes.

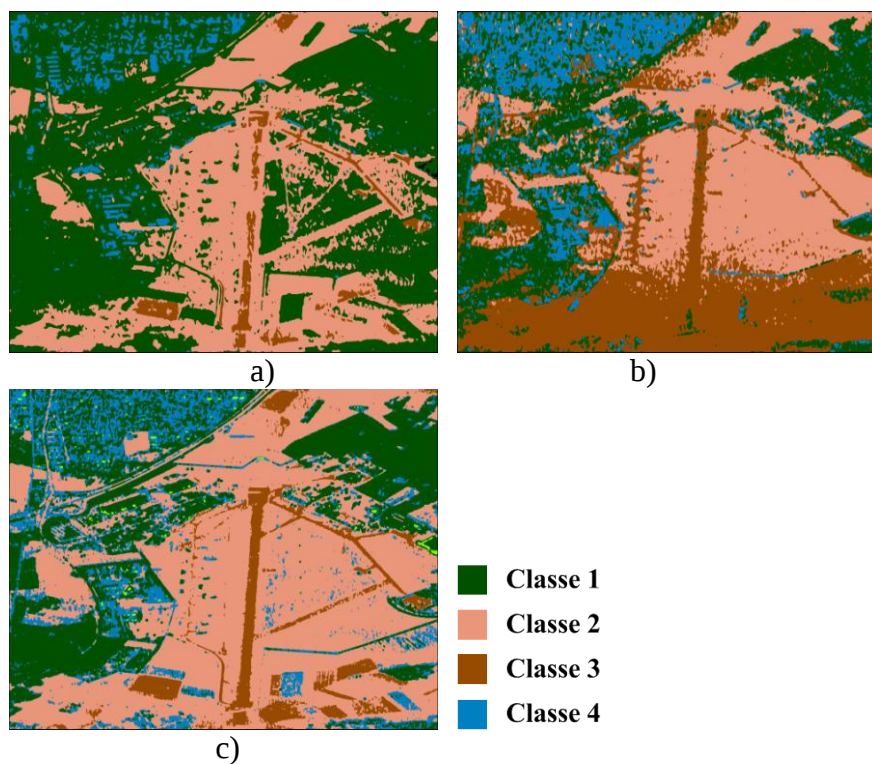


Figura 4. Classificação para quatro classes. a) Classificação pela Distribuição Wishart. b) Classificação pelo Coeficiente de Correlação de Pearson. c) Classificação pela Distância.

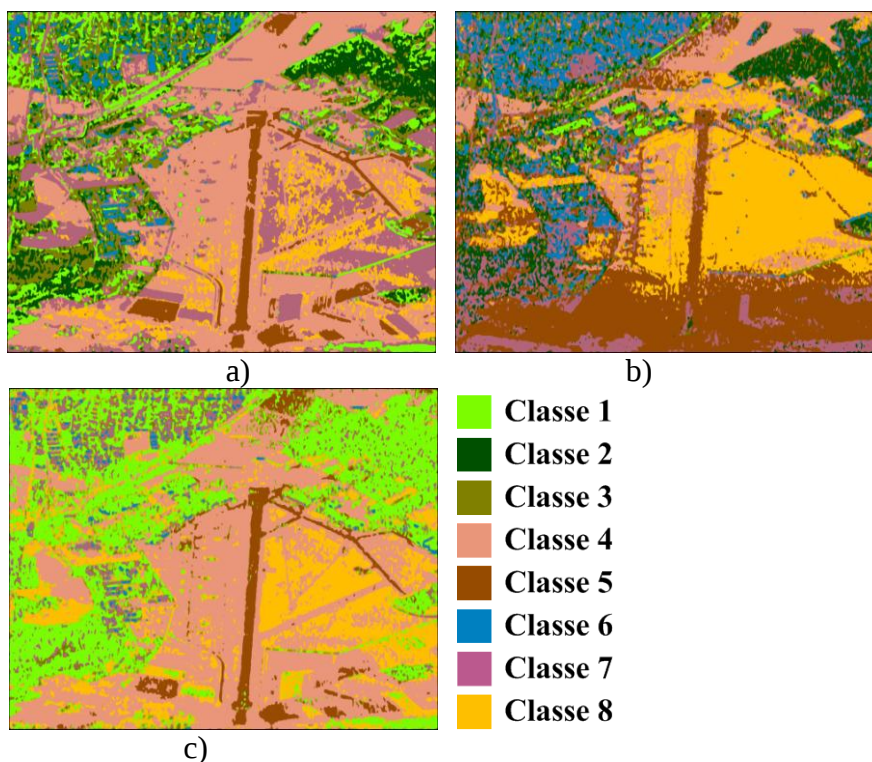


Figura 5. Classificação para oito classes. a) Classificação pela Distribuição Wishart. b) Classificação pelo Coeficiente de Correlação de Pearson. c) Classificação pela Distância .

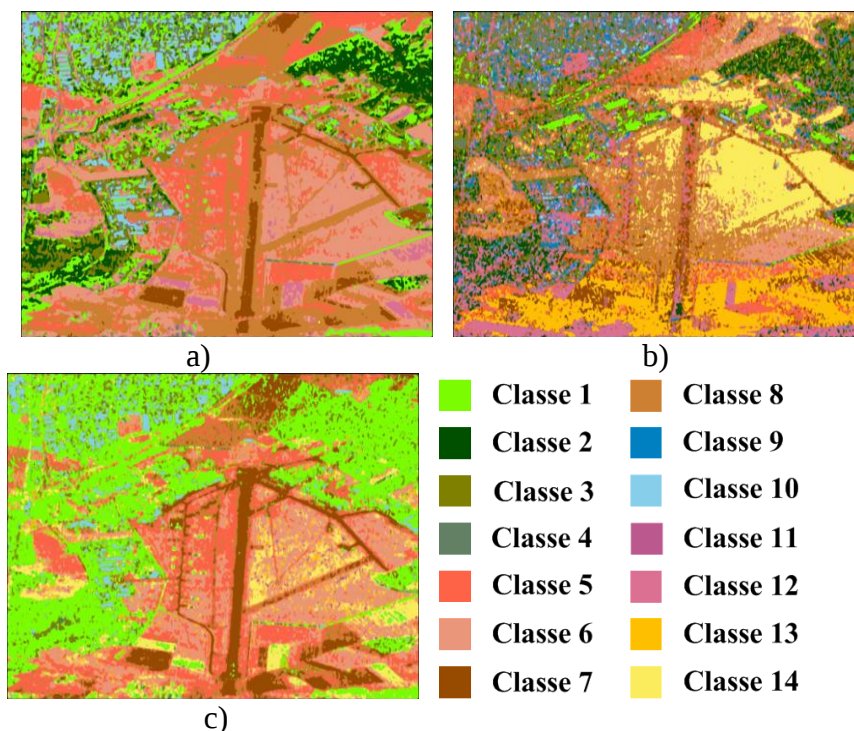


Figura 6. Classificação para catorze classes. a) Classificação pela Distribuição Wishart. b) Classificação pelo Coeficiente de Correlação de Pearson. c) Classificação pela Distância.

Depois da classificação das imagens foi calculada a matriz de confusão o seu respectivo Coeficiente Kappa (Figueiredo e Vieira, 2007) utilizando-se como verdade terrestre regiões homogêneas de 32x32 pixels em cada uma das classes presentes na imagem. A Tabela 1 apresenta os Kappas obtidos nas classificações das Figuras, 4, 5 e 6.

Tabela 1. Valores de Kappas das classificações.

	4 classes	8 classes	16 classes
Wishart	94,65	81,50	77,63
DT	100,00	71,28	54,70
CC	97,28	100,00	99,00

Na Tabela 1 constata-se que a classificação utilizando o coeficiente de correlação CC das matrizes [W] produziu-se os melhores resultados quando são consideradas 8 e 16 classes. Apesar de todos os três processos de classificação testados terem um bom desempenho com quatro classes o que utilizou a distância DT entre as matrizes [W] apresentou o melhor resultado.

Na classificação com quatro classes a classificação pelo método da verossimilhança utilizando a distribuição de Wishart apresentou melhor resultado para a zona homogênea gramado, mas o Coeficiente de Correlação de Pearson apresentou melhor resultado para as zonas Heterogêneas (Floresta e Área Urbana), já a Distância Euclidiana teve o melhor resultado nas Áreas de solo exposto. Para classificação em oito e dezesseis classes observou-se um decréscimo de desempenho da classificação pela DT, pois esse classificador se mostrou ineficaz para as zonas de vegetação, não conseguindo distinguir as variações das zonas 1, 2 e 3. Isso não ocorre para as classificações utilizando Wishart e CC, ambos os classificadores se mostraram eficientes na classificação de todas as zonas.

5. Comentários Finais

Este trabalho fez a proposta de dois métodos de classificação não supervisionada de imagens SAR polarimétricas. Um dos métodos utilizou o coeficiente de correlação de Pearson e o outro a distância entre matrizes [W]. Para comparação de resultados utilizou-se o método da razão de verossimilhança considerando-se a Distribuição Wishart relativa às matrizes de coerência. Todos os métodos utilizaram a pré classificação das imagens utilizando os parâmetros $H-\alpha-A$, considerando-se quatro, oito e dezesseis classes. Diante das análises realizadas na seção anterior, os resultados mostraram que os três métodos atingiram o objetivo e classificaram bem as imagens de modo geral. No entanto os melhores resultados, como pode ser comprovado pela Tabela 1, foram obtidos, primeiro, com o Coeficiente de Correlação de Pearson entre matrizes [W], depois pelo método da razão de máxima verossimilhança utilizando a Distribuição Wishart e por último pela distância entre matrizes [W], embora este último tenha obtido o melhor resultado para o caso de quatro classes.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da FINEP (Convênio 01.10.058.00), CNPq (Bolsas DTI) e FUNDEP (Projeto 16988) para a realização deste trabalho e ao Instituto de Microondas e Radar do Centro Alemão de pesquisa Aeroespacial (DLR) pela imagens SAR disponibilizadas.

Referências

- Cloude, S. R.; Pottier, E.; **A Review of Target decomposition theorems in radar polarimetric**. IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing, VOL. 34, No. 2, 1996
- Cloude, S.R.; Pottier, E. **An Entropy Based Classification Scheme for Land Applications of Polarimetric SAR**. IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing, v. 35, n. 1, p. 68-70, 1997.
- Correia, A.H. **Método automático para calibração polarimétrica de imagens SAR**. 2009. 307 p. (INPE-16349-TDI-1557). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2009.
- Figueiredo, G.C.; Vieira, C.A.O. Estudo do comportamento dos índices de Exatidão Global, Kappa e Tau, comumente usados para avaliar a classificação de imagens do sensoriamento remoto. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13, 2007, Florianópolis. **Anais XIII**. São José dos Campos: INPE, 2007. Artigos, p. 4919-4926.
- Hellmann, M. **Classification of Fully Polarimetric SAR Data for Cartographic Application**. 2000. Tese (Doutorado – PhD) - Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme des DLR, Oberpfaffenhofen . 2000.
- Krauss, C.V.M.; Fernandes, D. Realce na detecção de espalhadores secundários em imagens polarimétricas SAR através do cálculo da anisotropia modificada. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13, 2007, Florianópolis. **Anais XIII**. São José dos Campos: INPE, 2007. Artigos, p. 4919-4926.
- Lee, J-S; Grunes, M.R. **Classification of multi-look polarimetric SAR data based on complex Wishart distribution**. IEEE Telesystems Conference, p. 21-24.
- Ouarzeddine, M.; Boularbah, S.; Belhadj, A. Unsupervised Classification Using Wishart Classifier. In: Proceedings of the 3rd International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry, 3, 2007, **Anais III**. Frascati, Italy , 2007. Artigos, p. 4919-4926.
- Villaça, D.D. **Classificação de imagens SAR utilizando a resposta polarimétrica**. 2008. 131 p. (CTA/ITA/DM-080/2008). Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica e Computação) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica. 2008.
- Villaça, D.D.; Fernandes, D. A resposta polarimétrica na classificação de imagens SAR. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 14, 2009, Florianópolis. **Anais XIV**. São José dos Campos: INPE, 2009. Artigos, p. 7513-7519.