

## A resposta polarimétrica na classificação de imagens SAR

Daniel Drummond Villaça<sup>1,2</sup>  
David Fernandes<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Comando Geral de Operações Aéreas - COMGAR  
Brasília – DF, Brasil  
ddvillaca@gmail.com

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA  
São José dos Campos - SP, Brasil  
david@ita.br

**Abstract.** The development of Synthetic Aperture Radars (SAR) with polarimetric capability requires specific image processing algorithms, taking into account the properties related with the SAR polarimetric images. The processing techniques of SAR polarimetry are relatively new, but they are showing its strong potential in the classification tasks through polarimetric parameters like: entropy, anisotropy, angles Alpha-Beta and polarimetric response. The main aim of this work is to investigate the methodology of classification using the calculation of the co-polarization and cross-polarization response of targets present in a SAR image. By selecting samples of each class in the image, a standard sample can be defined and its polarimetric response can be correlated with the polarization response of each pixel in the image, considering the pixel neighborhood. The greatest correlation coefficient identifies the pixel class. A variation in the classification method is also proposed through the use of the  $W$  matrix, that is used in the polarimetric response calculation. The main gain of using only the  $W$  matrix in the classification is the reduction in computer processing time. Again, a standard sample can be defined and its  $W$  matrix can be correlated to the  $W$  matrix of each pixel in the image. Another classification possibility explored in this work is the combination of the polarimetric response and the  $W$  matrix. The classification performance was tested with a polarimetric L-band ESAR image from the Microwave and Radar Institute - German Aerospace Center (DLR).

**Palavras-chave:** radar de abertura sintética, polarimetria SAR, resposta polarimétrica principal, resposta polarimétrica cruzada, matriz  $W$ , classificação polarimétrica de imagens.

### 1. Introdução

As imagens SAR são o resultado do processo de retroespalhamento de uma onda eletromagnética transmitida com uma polarização horizontal ( $h$ ) ou vertical ( $v$ ), que pode ser recebida na forma de um campo elétrico  $E_h$  e/ou  $E_v$ , formando assim um conjunto possível de imagens SAR: HH, HV, VH e VV. A este conjunto de imagens, dá-se o nome de imagens polarimétricas. Pelo princípio de reciprocidade, sendo o meio homogêneo, sem apresentar a rotação de Faraday e com o sistema SAR calibrado, as imagens HV e VH são equivalentes.

No contexto da Polarimetria SAR, o conjunto das quatro imagens representam, para cada pixel (picture element) da imagem, a matriz de espalhamento  $[S]$ . Da matriz espalhamento podem ser estimados vários parâmetros que auxiliam na classificação e caracterização dos alvos, dentre estes tem-se: a entropia, a anisotropia, os ângulos alfa e beta e a resposta polarimétrica (Lüneburg, 1995; Cloude e Pottier, 1996; Ulaby e Elachi, 1990; Krauss, 2007).

Este trabalho estuda a classificação de imagens SAR polarimétricas, utilizando diretamente a resposta polarimétrica de cada pixel da imagem. No cálculo da resposta polarimétrica, no modo polarização principal e polarização cruzada, é necessário o cálculo da matriz  $[W]$ , cujos elementos são todas as possíveis multiplicações, dois a dois, dos elementos da Matriz Espalhamento. Avalia-se também a classificação da imagem SAR polarimétrica utilizando-se somente a matriz  $[W]$  e compara-se o resultado com a classificação realizada com a resposta polarimétrica. Ressalta-se que o esforço computacional de uma classificação com a matriz  $[W]$  é muito menor do que a classificação com as respostas polarimétricas.

## 2. Resposta polarimétrica

Um dos elementos principais para a caracterização da energia retroespalhada por um alvo é a matriz de espalhamento  $[S]$ , que relaciona os campos espalhado e incidente, conforme a relação:

$$\begin{bmatrix} E_h^{es} \\ E_v^{es} \end{bmatrix} = \frac{\exp\{-jk_o r\}}{\sqrt{4\pi r}} [S] \begin{bmatrix} E_h^{in} \\ E_v^{in} \end{bmatrix}, \quad [S] = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde  $E_h^{in}$ ,  $E_v^{in}$ ,  $E_h^{es}$  e  $E_v^{es}$  são as componentes horizontal ( $h$ ) e vertical ( $v$ ) dos campos incidente ( $in$ ) e espalhado ( $es$ ) e  $k_o = 2\pi/\lambda$  é o número de onda, sendo  $\lambda$  o comprimento de onda da portadora, e  $r$  a distância do alvo ao radar. Neste trabalho, a matriz espalhamento será considerada no sistema de referência BSA - Back Scattering Alignment (Ulaby e Elachi, 1990).

Idealmente, as imagens SAR polarimétricas representam, para cada pixel da imagem, a matriz espalhamento do alvo contido em uma célula de resolução (CR) do SAR.

Em (1) a onda eletromagnética, incidente ou refletida, é representada pelas suas componentes horizontal e vertical, mas uma outra forma de representação da onda eletromagnética é o vetor de Stokes (Ulaby, Elachi, 1990). Considerando uma onda eletromagnética com as componentes horizontal e vertical do campo elétrico, dadas respectivamente por  $E_h$  e  $E_v$ , tem-se:

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} I_0 \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle |E_h|^2 \rangle + \langle |E_v|^2 \rangle \\ \langle |E_h|^2 \rangle - \langle |E_v|^2 \rangle \\ 2 \operatorname{Re}(\langle E_h E_v^* \rangle) \\ 2 \operatorname{Im}(\langle E_h E_v^* \rangle) \end{bmatrix} = \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2} \begin{bmatrix} I_0 / \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2} \\ \cos(2\psi_p) \cos(2\chi_p) \\ \sin(2\psi_p) \cos(2\chi_p) \\ \sin(2\chi_p) \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde  $\langle \cdot \rangle$  é o operador média estatística,  $\chi_p$  e  $\psi_p$  são, respectivamente, os ângulos de elipsidade e de inclinação da elipse de polarização da componente polarizada da onda.  $I_0$ ,  $Q$ ,  $U$  e  $V$  são parâmetros das componentes horizontal e vertical do campo elétrico, dadas respectivamente por  $E_h$  e  $E_v$ .  $I_0^2 \geq Q^2 + U^2 + V^2$ , mas para uma onda dita completamente polarizada vale a igualdade.

Uma outra forma conveniente de se expressar o vetor de Stokes é dada por:

$$\vec{F}^m = [R]G^m \quad (3)$$

onde  $m \in \{t, r\}$ , representando a onda transmitida ( $t$ ) ou recebida ( $r$ ), que tem componentes  $(E_h^t, E_v^t)$  e  $(E_h^r, E_v^r)$ . A matriz  $[R]$  e o vetor  $G^m$  são definidos como:

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -j & j \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$G^m = \begin{bmatrix} E_h^m E_h^{m*} \\ E_v^m E_v^{m*} \\ E_h^m E_v^{m*} \\ E_v^m E_h^{m*} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Considerando-se um meio sem distorção e associando-se o campo espalhado ao recebido e o incidente ao transmitido pode-se, a partir da expressão (1), obter-se a seguinte relação:

$$G^r = \frac{1}{4\pi r^2} [W] G^t \quad (6)$$

onde:

$$[W] = \begin{bmatrix} S_{HH} S_{HH}^* & S_{HV} S_{HV}^* & S_{HH} S_{HV}^* & S_{HV} S_{HH}^* \\ S_{VH} S_{VH}^* & S_{VV} S_{VV}^* & S_{VH} S_{VV}^* & S_{VV} S_{VH}^* \\ S_{HH} S_{VH}^* & S_{HV} S_{VV}^* & S_{HH} S_{VV}^* & S_{HV} S_{VH}^* \\ S_{VH} S_{HH}^* & S_{VV} S_{HV}^* & S_{VH} S_{HV}^* & S_{VV} S_{HH}^* \end{bmatrix} \quad (7)$$

A Seção Reta Radar ( $\bar{\sigma}$ ) e o coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^o$ ) podem ser calculados de dois modos básicos (Ulaby, Elachi, 1990; Boerner et al., 1998):

a) Polarização principal:

Quando os ângulos de polarização das ondas transmitidas e recebidas seguem as relações:  $\psi_r = \psi_t = \psi$  (mesma inclinação das elipses de polarização) e  $\chi_r = \chi_t = \chi$  (mesmas polarizações para a direita ou para a esquerda):

$$\bar{\sigma}_{co}(\psi, \chi) = (\bar{p}(\psi, \chi))^T \cdot \left[ [R]^T \right]^{-1} \langle [W] \rangle [R]^{-1} \bar{p}(\psi, \chi) \quad (8)$$

onde

$$\bar{p}(\psi, \chi) = [1 \quad \cos(2\psi)\cos(2\chi) \quad \sin(2\psi)\cos(2\chi) \quad \sin(2\chi)]^T \quad (9)$$

é o vetor de Stokes de uma onda eletromagnética de energia unitária, e

$$\sigma_{co}^o(\psi, \chi) = \frac{\bar{\sigma}_{co}(\psi, \chi)}{A_{CR}} \quad (10)$$

onde  $A_{CR}$  é a área de uma célula de resolução.

b) Polarização cruzada:

Quando os ângulos de polarização das ondas transmitidas e recebidas seguem as relações:  $\psi_r = \psi_t + \pi/2$  (ortogonalidade entre a inclinação das elipses de polarização) e  $\chi_r = -\chi_t$  (polarizações opostas direita/esquerda):

$$\bar{\sigma}_{cr}(\psi, \chi) = (\bar{p}(\psi, \chi))^T \cdot \left[ [R]^T \right]^{-1} \langle [W] \rangle [R]^{-1} \bar{p}(\psi + \pi/2, -\chi) \quad (11)$$

e

$$\sigma_{cr}^o(\psi, \chi) = \frac{\bar{\sigma}_{cr}(\psi, \chi)}{A_{CR}} \quad (12)$$

As funções  $\bar{\sigma}_{co}(\psi, \chi)$  e  $\bar{\sigma}_{cr}(\psi, \chi)$  são as respostas polarimétricas principal e cruzada de um alvo pontual e  $\sigma_{co}^o(\psi, \chi)$  e  $\sigma_{cr}^o(\psi, \chi)$  são as respostas polarimétricas principal e cruzada de um alvo extenso.

O operador média  $\langle \cdot \rangle$  é usualmente aplicado em uma vizinhança de uma amostra, considerando-se que o processo é ergódico localmente.

Tanto a resposta polarimétrica como a matriz complexa  $\langle [W] \rangle$  foram utilizadas para avaliação da classificação de alvos na imagem SAR teste.

### 3. Processo de Classificação

Utilizou-se, neste estudo, uma imagem 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. A Figura 1 mostra uma composição colorida da imagem teste e as sete classes consideradas: pista de pouso, grama, floresta, construções A, construções B, cidade e uma área de cultivo.

Por meio de um processo de escolha supervisionado, selecionou-se amostras representativas das classes consideradas na imagem polarimétrica teste. Calculou-se, utilizando-se uma vizinhança de 17 pixels em azimute e 9 pixels em alcance, a resposta polarimétrica principal e cruzada e a matriz  $\langle [W] \rangle$  dessas amostras, denominadas de referência.

Realizou-se, então, a classificação da imagem SAR polarimétrica segundo os seguintes critérios:

Critério 1: Calculou-se o coeficiente de correlação entre a resposta polarimétrica principal de todos os pixels da imagem, considerando-se uma vizinhança de 17 pixels em azimute e 9 pixels em alcance, com a resposta polarimétrica principal das amostras de referência para cada classe. Como critério de classificação, foi escolhida a classe relativa à amostra de referência de maior correlação com o pixel considerado.

Critério 2: Calculou-se o coeficiente de correlação entre a resposta polarimétrica cruzada de todos os pixels da imagem, considerando-se uma vizinhança de 17 x 9 pixels, com a resposta polarimétrica cruzada das amostras de referência de cada classe. Como critério de classificação, foi escolhida a classe relativa à amostra de referência de maior correlação com o pixel considerado.

Critério 3: Um pixel da imagem foi considerado de uma determinada classe, somente se foi classificado na mesma classe pelos critérios 1 e 2.

Critério 4: Calculou-se o coeficiente de correlação entre a matriz  $\langle [W] \rangle$  de todos os pixels da imagem, considerando-se uma vizinhança de 17 x 9 pixels, com a matriz  $\langle [W] \rangle$  de referência para cada classe. Como critério de classificação, foi escolhida a classe relativa à matriz de referência de maior correlação com o pixel considerado.

Critério 5: Um pixel da imagem foi considerado de uma determinada classe, somente se ele foi classificado na mesma classe pelos critérios 1, 2 e 4.

A Figura 2 representa os resultados das classificações, considerando-se os vários critérios. Nestas imagens utilizou-se a seguinte nomenclatura:

- CP – classificação pela resposta polarimétrica principal, critério 1;
- CC – classificação pela resposta polarimétrica cruzada, critério 2;
- W – classificação pela matriz  $\langle [W] \rangle$ , critério 4;
- CP - CC – classificação pela resposta polarimétrica principal e cruzada, critério 3; e

- CP - CC - W – classificação pela resposta polarimétrica principal, cruzada e matriz  $\langle [W] \rangle$ , critério 5.

Para todas as classificações, foram definidos limiares de correlação, abaixo do qual o pixel é considerado não classificado. Os limiares utilizados foram de 0,5 para as classificações pela resposta polarimétrica principal e cruzada e 0,8 para a classificação pela matriz  $\langle [W] \rangle$ , os pixels com correlação abaixo desse valor foram apresentados na cor vermelha. Nas imagens CP - CC e CP - CC - W as áreas pretas representam a não coincidência de classes dos pixels e, portanto, são também áreas não classificadas.

De modo a avaliar o desempenho da classificação, foi calculado o coeficiente Kappa ( $K_{ap}$ ) (Figueiredo e Vieira, 2007) da matriz de confusão e o seu desvio padrão  $\sigma(K_{ap})$  para as três classificações básicas CP, CC e W, obtendo-se:

Classificação CP:  $K_{ap} = 0,788$  e  $\sigma(K_{ap}) = 0,0023$ .

Classificação CC:  $K_{ap} = 0,717$  e  $\sigma(K_{ap}) = 0,0025$ .

Classificação W:  $K_{ap} = 0,796$  e  $\sigma(K_{ap}) = 0,0023$ .

Pela análise do coeficiente Kappa conclui-se que o desempenho dessas três classificações é praticamente o mesmo.

Analisando-se a Figura 2, observa-se que a classe pista de pouso tem uma melhor discriminação utilizando-se a imagem W. A imagem CP e, principalmente, a CC apresentaram elevado falso alarme. O melhor resultado foi dado pela combinação CP - CC - W.

Para a classe grama, obteve-se um melhor resultado com as imagens CP e CC, a imagem W deixou de classificar algumas áreas gramadas. As melhores classificações foram com a CC e CP - CC.

Quanto à classe floresta, a melhor classificação foi com a imagem CP. A imagem W também apresentou um bom resultado, entretanto classificou como floresta uma parte da região centro-norte.

A melhor classificação para a classe cidade foi obtida nas imagens CP e CC, bem como na sua combinação, CP - CC. Da mesma forma que para a floresta, é natural existirem estruturas com respostas semelhantes à cidade, em várias regiões da imagem.

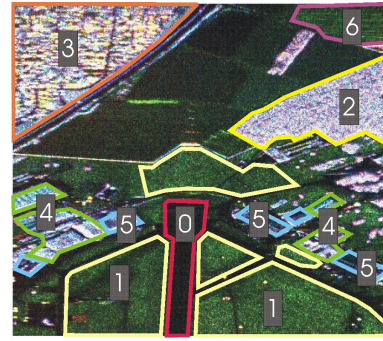
As estruturas denominadas construções A, com maior retorno, foram identificadas de forma semelhante nas três imagens, CP, CC e W. A melhor classificação ocorreu na imagem W. As estruturas denominadas de construções B, de menor retorno, não foram identificadas a contento com as imagens CP e CC. A classificação W apresentou o melhor resultado.

As classificações do cultivo foram semelhantes em todos os métodos, com um pouco mais de falso alarme na imagem CC. Os melhores resultados foram nas imagens CP - CC e CP - CC - W, que apresentaram características semelhantes.

Testou-se, ainda, o efeito da diminuição da vizinhança de 17X9 pixels para 9X5 e 3X3 pixels. A diminuição acarretou alguma melhora na classificação das construções A e B, comprometendo, entretanto, o restante das classes.

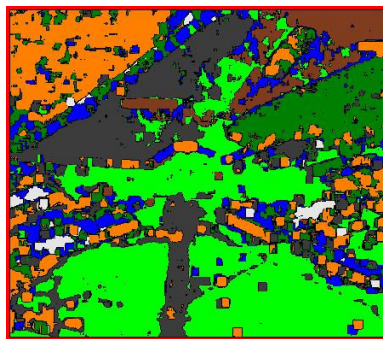


a) Composição colorida da imagem ESAR.

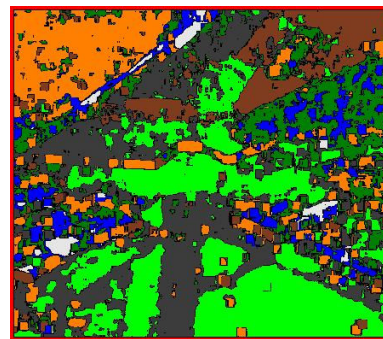


b) Classes: pista de pouso (0), grama (1), floresta (2), cidade (3), construções A (4), construções B (5) e área de cultivo(6).

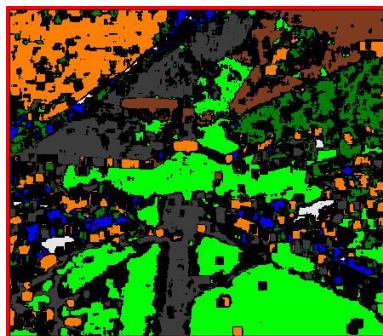
**Figura 1. Imagem SAR polarimétrica do ESAR/DLR.**



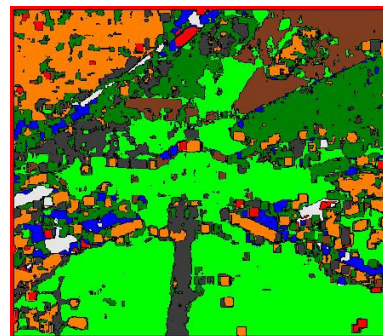
CP



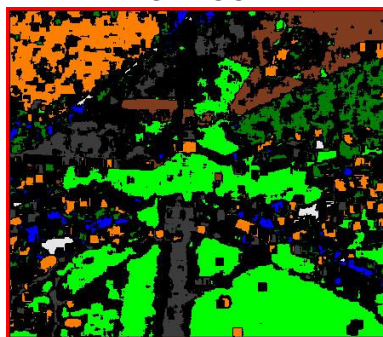
CC



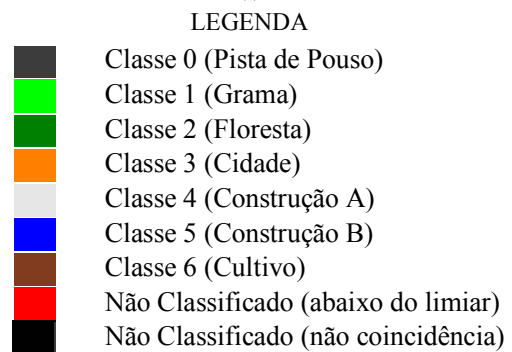
CP - CC



W



CP - CC - W



**Figura 2. Resultados da classificação da imagem polarimétrica.**

#### 4. Comentários Finais

A utilização da matriz  $\langle [W] \rangle$  para a classificação da imagem teste obteve resultados compatíveis com os processos de classificação que utilizaram a resposta polarimétrica principal e cruzada. Como o uso da matriz  $\langle [W] \rangle$  reduz drasticamente o esforço computacional, este tipo de classificação pode ser utilizado em processadores que tenham como requisito de desempenho a velocidade da classificação, como por exemplo em sistemas de tempo real embarcado em aeronaves.

#### 5. Agradecimentos

Ao Laboratório de Guerra Eletrônica do ITA e ao projeto CAPTAER-FINEP em desenvolvimento no ITA pelo apoio ao trabalho realizado.

#### 6. Referências bibliográficas

- Cloude, Shane R.; Pottier, E., W. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. **IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, n. 2, p. 498-518, 1996.
- Boer, W.; Mott, H.; Lüneberg, E.; Livingstone, C.; Brisco, B.; Brown, R.; Patterson, J. **Polarimetry in Radar Remote Sensing: Basic and Applied Concept, in Principles and Applications of Imaging Radar, Manual of Remote Sensing**, 3rd Ed., v. 3, Henderson F. and Lewis A., Eds., Wiley and Sons, 1998.
- 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 de sensoriamento remoto. IN: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais ...Florianópolis: INPE, 2007. p. 1CD.
- Krauss, C. V. M. **Avaliação do Vetor Espalhamento nas Medidas de Entropia e Anisotropia em Imagens SAR Polarimétricas**. 2007. 120 p. (CTA/ITA-IEE/TN-005/2007). Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica e Computação) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 2007.
- Lüneburg, E. Principles of radar polarimetry. **Proceedings of the Trans. Electronic Theory**, v. E78-C, n. 10, p. 1339-1345, 1995.
- Ulaby, F. T.; Elachi, C. **Radar polarimetry for geoscience applications**. London: Artech House, 1990. 364 p.