

Polarimetria SAR: Conceitos básicos e aplicações no monitoramento oceânico

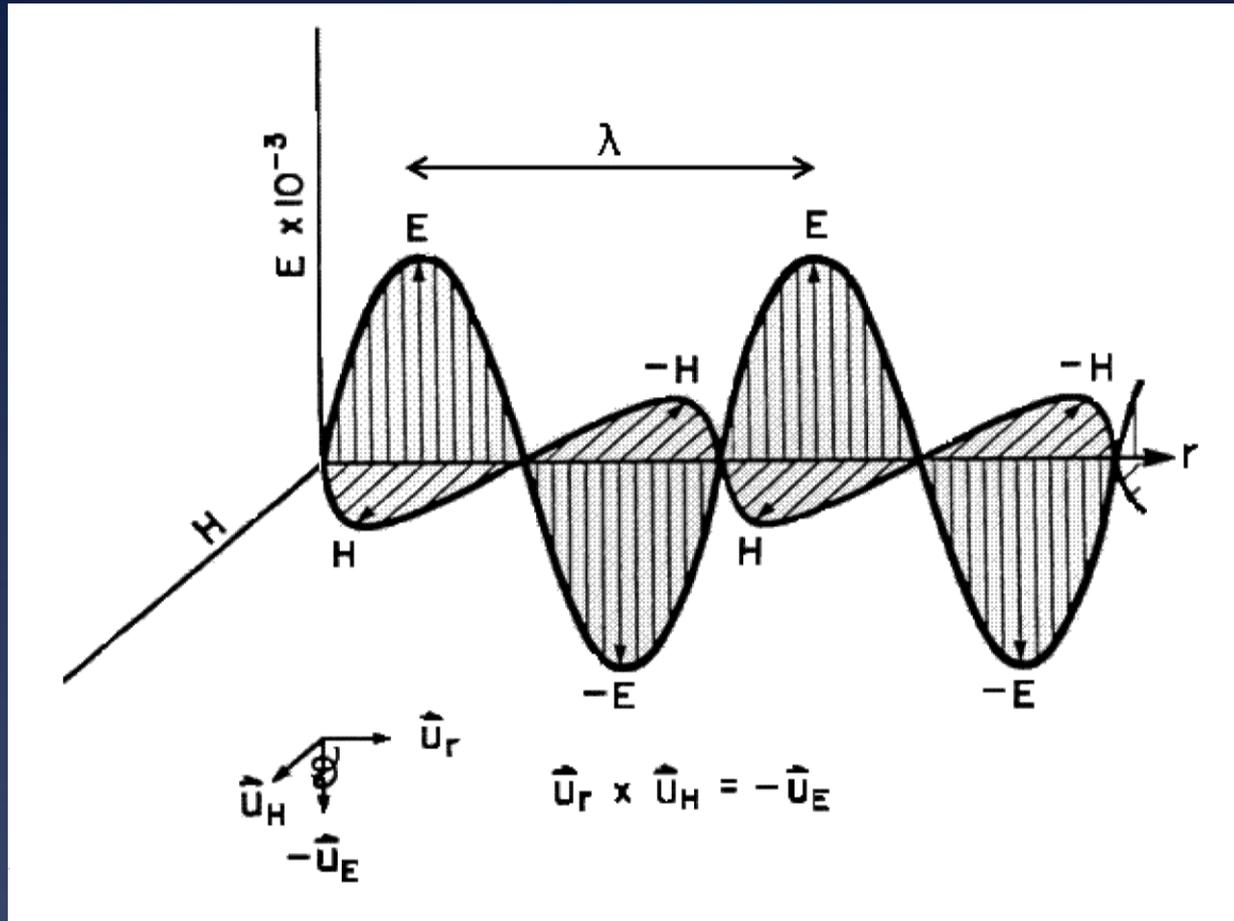
João A. Lorenzetti

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

MCTIC

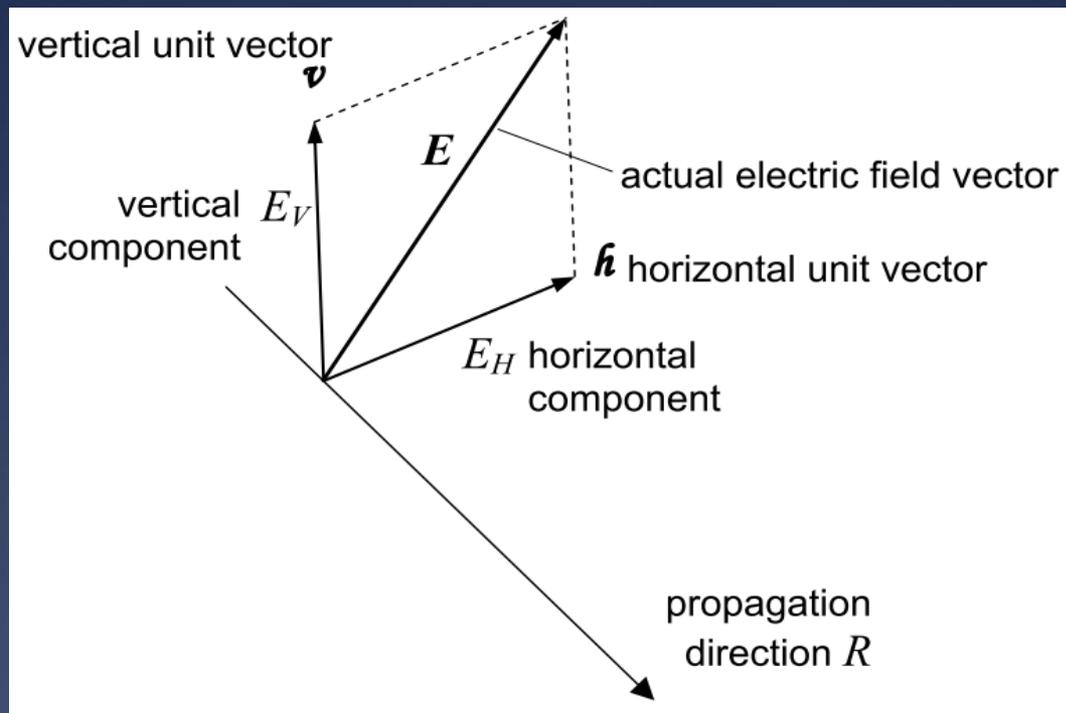
São José dos Campos, SP

Representação esquemática de uma Onda Eletromagnética



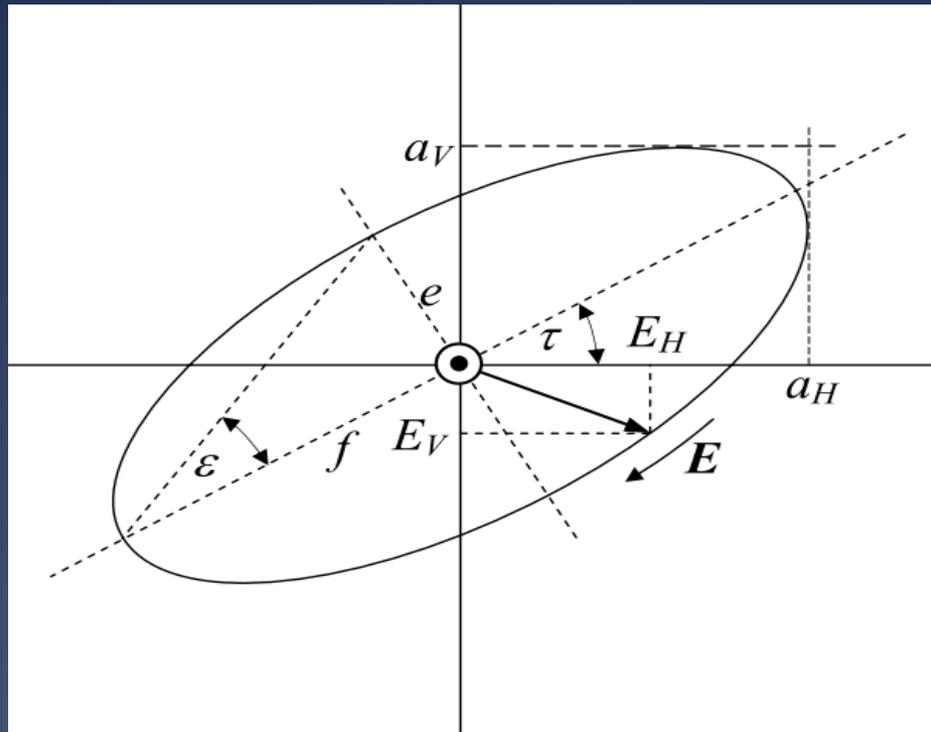
A polarização de uma Onda Eletromagnética - OEM

Se nos concentrarmos no Campo Elétrico (\mathbf{E}) de uma OEM plana, num dado instante de tempo, ele pode ser representado por um vetor que apresentará uma orientação num plano perpendicular ao vetor de propagação, e que pode ser decomposto em duas componentes ortogonais entre si, p.ex. horizontal e vertical:



A polarização de uma Onda Eletromagnética - OEM

Da maneira mais geral, à medida que a OEM propaga, a ponta do vetor \mathbf{E} traça uma elipse num plano perpendicular à direção de propagação. A polarização da OEM é totalmente descrita pelos parâmetros da elipse de polarização: τ = o **ângulo de orientação** de polarização; $\varepsilon = e/f$ a **elipticidade**, e, $A = (a_V^2 + a_H^2)^{1/2}$ a **intensidade** da onda.



A polarização de uma Onda Eletromagnética - OEM

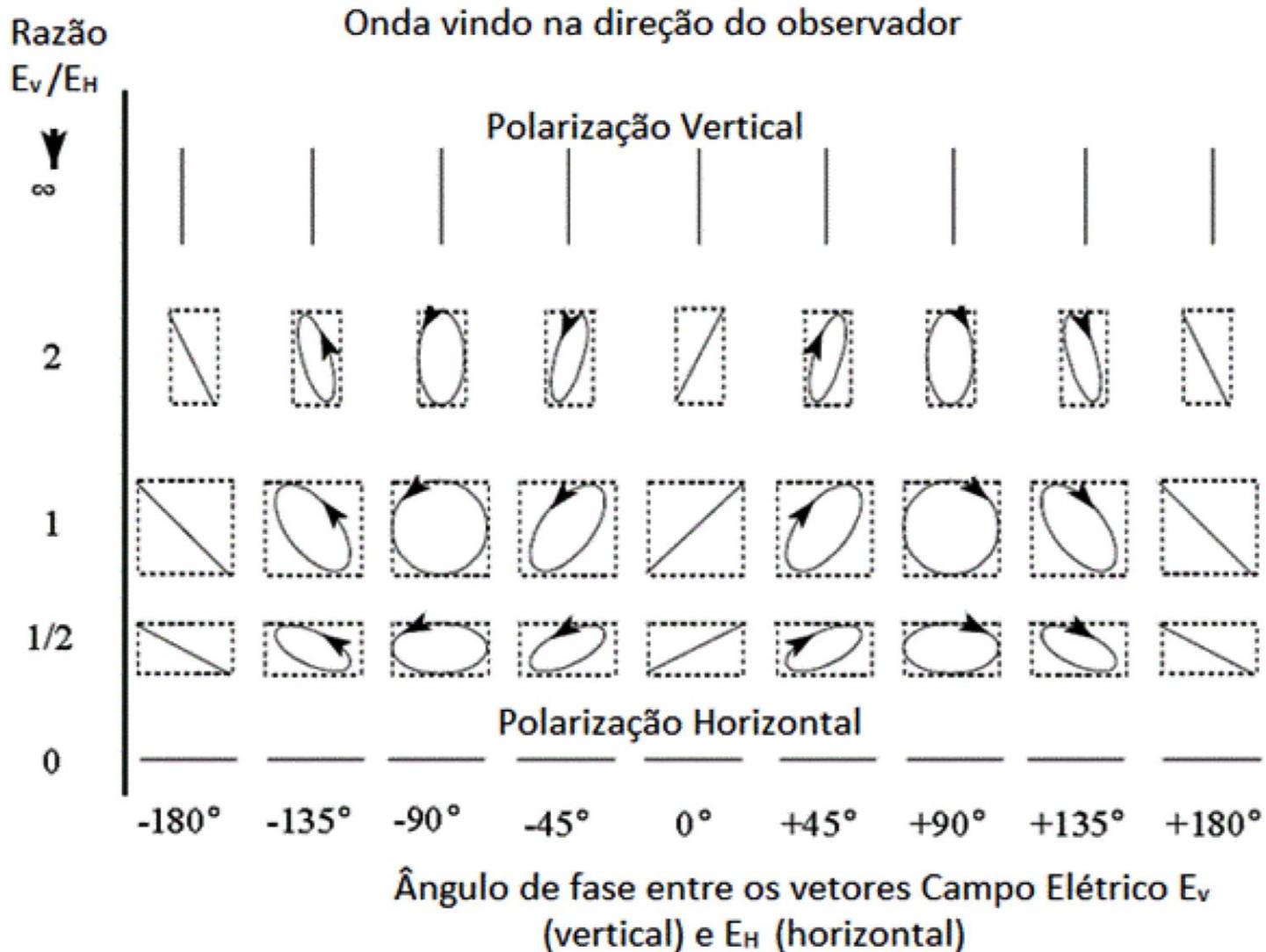
Se a OEM estiver propagando na direção-z , então podemos escrever:

$$\vec{E}(z, t) = \begin{bmatrix} a_x \cos(\omega t - kz + \delta_x) \\ a_y \cos(\omega t - kz + \delta_y) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Onde \mathbf{a}_x e \mathbf{a}_y são as **magnitudes** de \mathbf{E} nas direções x e y, respectivamente. $\omega = 2\pi/T$ é a **frequência angular** da onda (rad/s) e T seu período (s). $k = 2\pi/\lambda$ é o **número de onda** (rad/m), e λ o comprimento de onda (m). δ_x e δ_y são as fases das componentes da onda.

Dependendo dos valores de a_x , a_y , δ_x and δ_y podemos ter todos os possíveis estados de polarização. Em termos de $\delta = \delta_y - \delta_x$ Podemos ter **polarização linear** (se $\delta=0$ or 180°), **circular** (se $\delta = \pm\pi/2$ e $a_x=a_y$). Se a polarização não é nem linear nem circular, ela será **elíptica** (a menos que seja totalmente não-polarizada).

A polarização de uma Onda Eletromagnética - OEM



A Matriz de Espalhamento - \mathbf{S}

Agora, para qualquer polarização, se quisermos relacionar o campo elétrico retro-espalhado ($E^b = (E_H^b, E_V^b)$) ao campo incidente sobre um alvo ($E^i = (E_H^i, E_V^i)$), isto pode ser feito por meio da matriz de espalhamento \mathbf{S} ;

$$\begin{bmatrix} E_H^b \\ E_V^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_H^i \\ E_V^i \end{bmatrix} \quad \text{OU} \quad E^b = \mathbf{S}E^i$$

Para um sistema SAR polarimétrico, os elementos de \mathbf{S} são números complexos, i.e. eles possuem magnitude e fase.

Pode ser mostrado que os termos de \mathbf{S} estão relacionados com a Seção Reta de Radar Normalizada (σ_{pq}^o), por

$$\sigma_{pq}^o = \frac{4\pi}{r_a r_g} \left| \mathbf{S}_{pq} \right|^2$$

Onde r_a e r_g são as resoluções SAR em azimute e range no terreno.

O Vetor Alvo - \mathbf{k} ou \mathbf{k}_p

Uma forma mais conveniente de descrever as propriedades polarimétricas de um pixel numa imagem SAR Pol é via uma vetorização da *matriz* \mathbf{S} . Uma forma possível é:

$$\mathbf{k} = [S_{HH} \quad S_{HV} \quad S_{VH} \quad S_{VV}]^T$$

Onde T é a operação de transposição de matrizes e \mathbf{k} é chamado de vetor alvo(em base lexicográfica).

Para retro-espalhamento, normalmente se assume que $S_{HV} = S_{VH}$ e \mathbf{k} é normalmente re-escrito como:

$$\mathbf{k} = [S_{HH} \quad \sqrt{2}S_{HV} \quad S_{VV}]^T$$

One $(2)^{1/2}$ foi introduzido para preservar a norma de \mathbf{k} . Outra possibilidade é a assim chamada de vectorização de Pauli , na qual:

$$\mathbf{k}_P = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV} \quad S_{HH} - S_{VV} \quad 2S_{HV}]^T$$

Matrizes de Covariância e Coerência

Uma forma frequentemente usada para representar as propriedades polarimétricas de uma área é feita usando-se as matrizes de covariância \mathbf{C} , ou coerência \mathbf{T} , e o **valor esperado** (uma média espacial ou um multilook) dos produtos internos de \mathbf{k} e \mathbf{k}_p

$$\mathbf{C} = E(\mathbf{k} \cdot \mathbf{k}^{*T})$$

e

$$\mathbf{T} = E(\mathbf{k}_p \cdot \mathbf{k}_p^{*T})$$

Onde $E(\)$ representa o valor esperado estatístico.

A decomposição polarimétrica de Cloude-Pottier

Essa é uma decomposição da matriz de coerência \mathbf{T} por autovetores e autovalores, proposta por Cloude-Pottier, que é baseada numa decomposição de similaridade de \mathbf{T} : i.e., uma matriz diagonal contendo seus autovalores (λ_i) e uma matriz U_3 (3x3) com os autovetores como colunas:

$$\langle |T| \rangle = [U_3] \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} [U_3]^*{}^T$$

Ou

$$T = \sum_{i=1}^3 \lambda_i u_i u_i^{*T}$$

Onde os u_i são os auto-vetores de \mathbf{T} .

A decomposição polarimétrica de Cloude-Pottier

A partir dessa decomposição de **T** Lee & Pottier (2009) propuseram as seguintes métricas:

a) **Entropia (H)**:
$$H = -\sum_{i=1}^3 p_i \log_3 p_i, \quad p_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^3 \lambda_i} \quad (0 \leq H \leq 1)$$

Quando $H \rightarrow 0$, a região imageada é caracterizada por um mecanismo dominante de espalhamento, $\lambda_1 \neq 0$, λ_2 e $\lambda_3 \approx 0$. Segundo Migliaccio et al. (2007): H baixo \rightarrow sup. mar limpa/ assemelhados a óleo com baixo amortecimento radar;

Quando $H \rightarrow 1$, $\lambda_1 \cong \lambda_2 \cong \lambda_3$ a cena é caracterizada por espalhamento completamente despolarizante, e três mecanismos de espalhamento, Segundo Migliaccio et al. (2007): H alto \rightarrow sup. do mar com cobertura de óleo.

A decomposição polarimétrica de Cloude-Pottier

A partir dessa decomposição de **T** Lee & Pottier (2009) propuseram as seguintes métricas:

b) **Anisotropia (A):** $A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad (0 \leq A \leq 1)$

O coeficiente de anisotropia (A), é complementar à H, e descreve o peso relativo dos dois menores autovalores.

c) **Ângulo médio de espalhamento ($\bar{\alpha}$):**

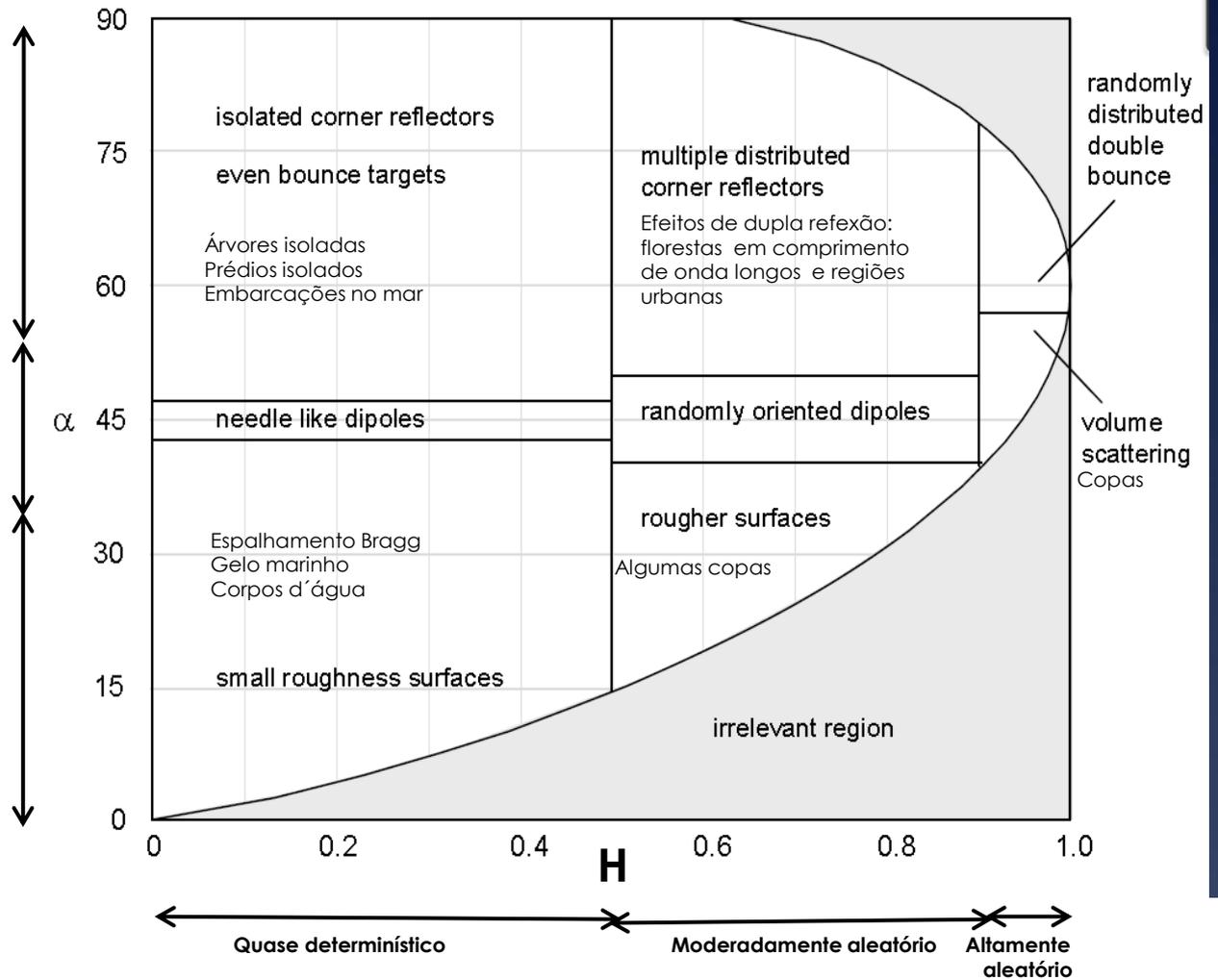
$$\bar{\alpha} = \sum_{i=1}^3 p_i \alpha_i \quad \text{onde } 0^\circ \leq \alpha_i = \cos^{-1}(|u_i(1)|) \leq 90^\circ$$

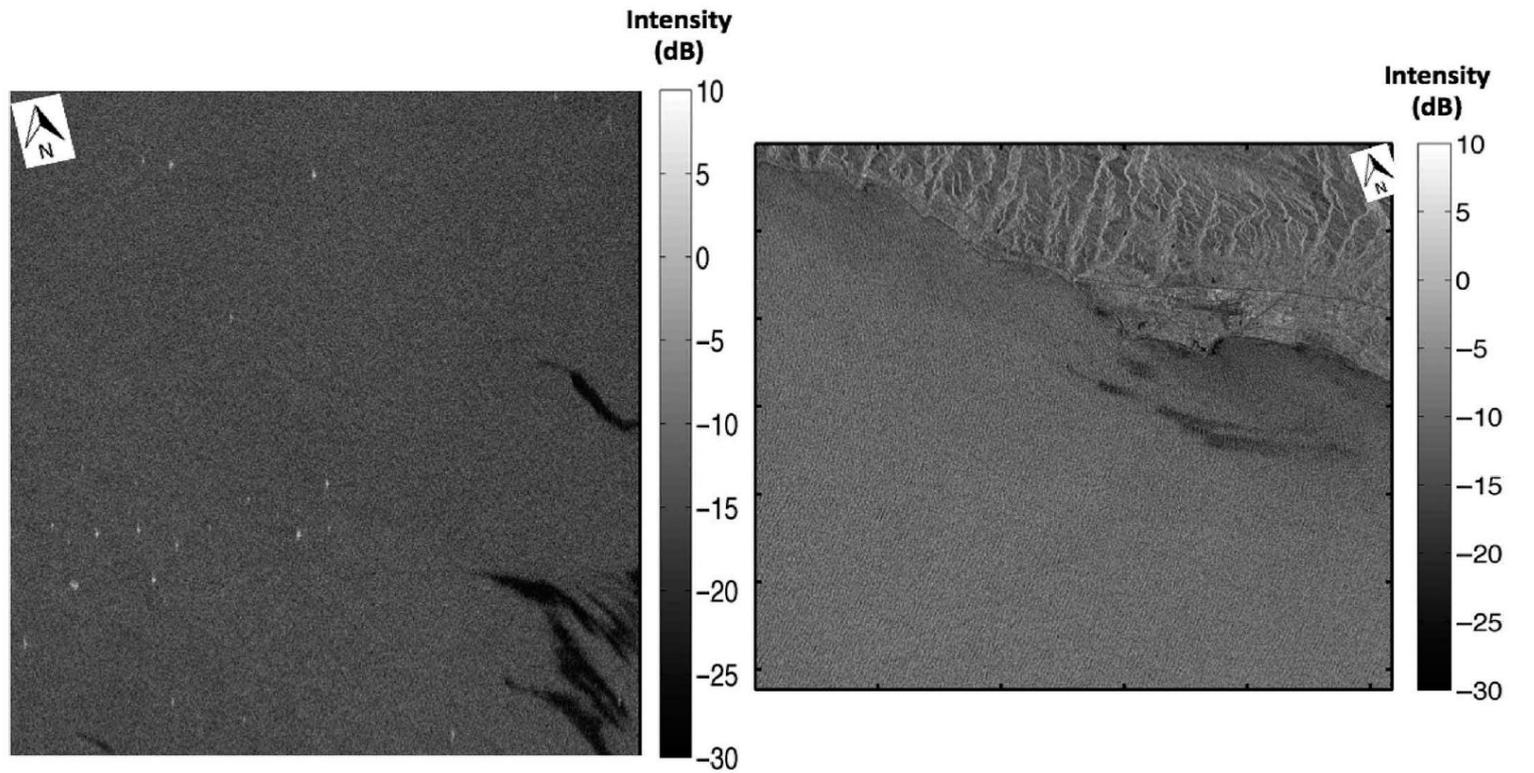
$\bar{\alpha}$ é normalmente usado em conjunto com H e A em polarimetria SAR para propósitos de classificação. Por exemplo: a superfície do oceano sem óleo é associada a valores de $\bar{\alpha}$ inferiores a 45° , enquanto maiores valores são esperados em áreas com óleo.

Espalhamento de duplo rebatimento

Difusão volumétrica

Espalhamento de superfície





A

A) Porção de imagem Radarsat-2 (16 km x 11 km) VV (intensidade em dB) Data: 15/05/2010
Local: Costa Louisiana, Golfo do México.

Alguns alvos metálicos (plataformas) e alguns derrames de óleo (oil slicks)

B

B) Porção de imagem Radarsat-2 (29 km x 12 km) VV (Intensidade em dB) Data: 14/12/2009
Local: Costa da Califórnia

Assemelhado de fraco amortecimento causado por descarte de água de produção de uma plataforma



Imagem entropia (H) da Figura A slide anterior

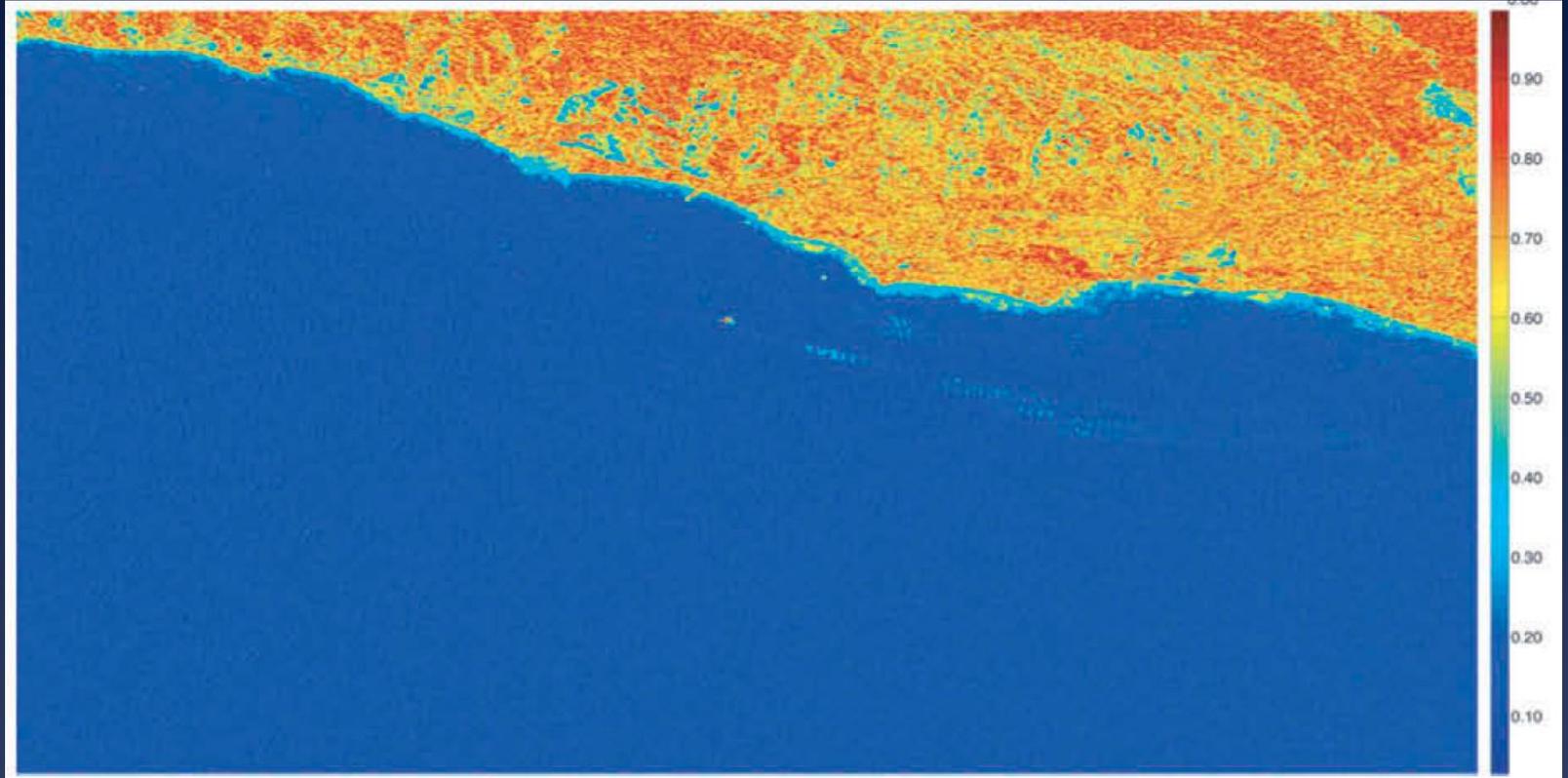
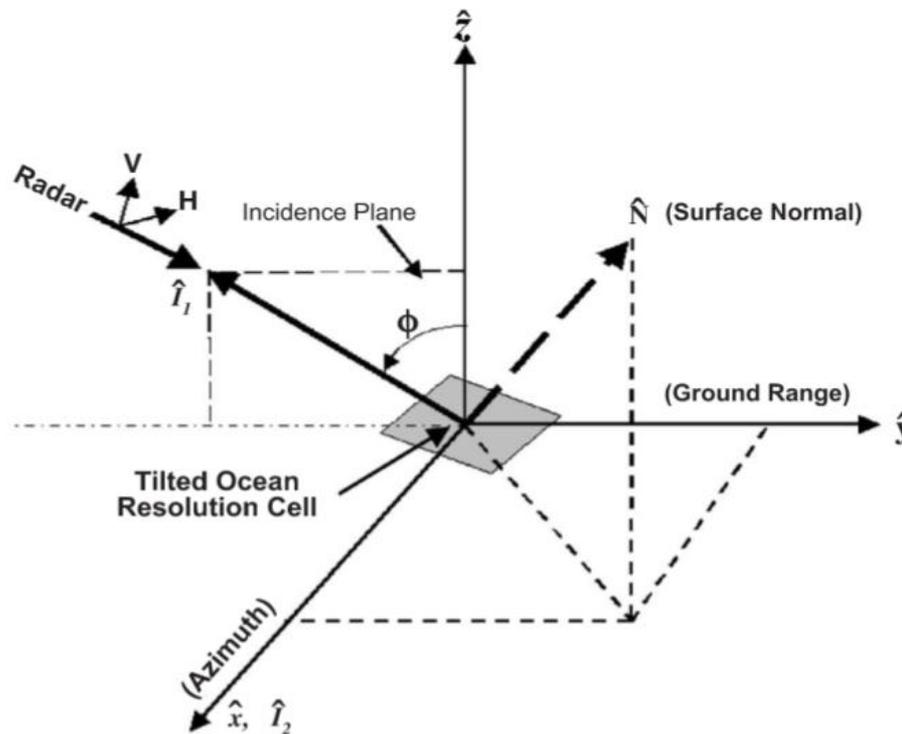


Imagem entropia (H) da Figura B slide anterior

Relacionando o ângulo de orientação (τ) à inclinações azimutais

Uma inclinação θ de uma porção da superfície do mar no plano perpendicular ao plano de incidência do feixe radar (inclinação azimutal), introduzirá modificações na matriz original de espalhamento \mathbf{S} , que é derivada assumindo-se uma superfície levemente rugosa, mas horizontal.



Essa inclinação é equivalente a uma rotação de θ graus na matriz \mathbf{S} ao longo do eixo de incidência.

Relacionando o ângulo de orientação (τ) à inclinações azimutais

A “nova” matriz S é matematicamente dada por

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} & S_{VH} & S_{VV} \\ S_{VH} & S_{HH} & S_{VV} & S_{HV} \\ S_{HH} & S_{HV} & S_{VV} & S_{VH} \\ S_{VV} & S_{HV} & S_{VH} & S_{HH} \end{bmatrix}$$

Obviamente, essa rotação modificará as matrizes Covariância e Coerência. Assumindo que o espalhamento Bragg é o mecanismo dominante, os termos fora da diagonal principal de S original podem ser considerados zero. Com essa simplificação, é possível se mostrar que

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{bmatrix}$$

Também, se prova que θ é a mudança do ângulo de orientação em relação a $\tau = 90^\circ$, a máxima resposta na assinatura Bragg copolarizada da superfície oceânica.

O parâmetro de as inclinações range

Assumindo que Bragg é o mecanismo de retro-espalhamento, é possível se mostrar que

$$\tan \alpha = \frac{S_{VV} - S_{HH}}{S_{VV} + S_{HH}}$$

As componentes de espalhamento Bragg da matriz **S** para valores da constante dielétrica da água do mar para frequências de micro-ondas (~80), podem ser aproximadas por

$$S_{VV} = 1 + \sin^2 \phi_i \quad \text{and} \quad S_{HH} = \cos^2 \phi_i, \quad \phi_i = \text{ang. incidência}$$

Que resulta em

$$\tan \alpha = \sin^2 \phi_i$$

Assim, se plotarmos alfa como função do ângulo de incidência e subtrairmos a relação teórica acima (ou uma função polinomial adequada), os desvios representam perturbações de inclinações range.

Alguns resultados preliminares para a costa SE do Brazil

1) Dados usados:

1.1 Dados de satélite:

ALOS/PALSAR

Mode: Polarimetric SLC (L1.1)

Aquisição: 13-abril-2009 01:56Z

Órbita: Ascendente

Visada: Direita

Resolução: 3.58m x 22.89m (Az x Rg)

Ângulos Incidência: 23.02° - 25.23°

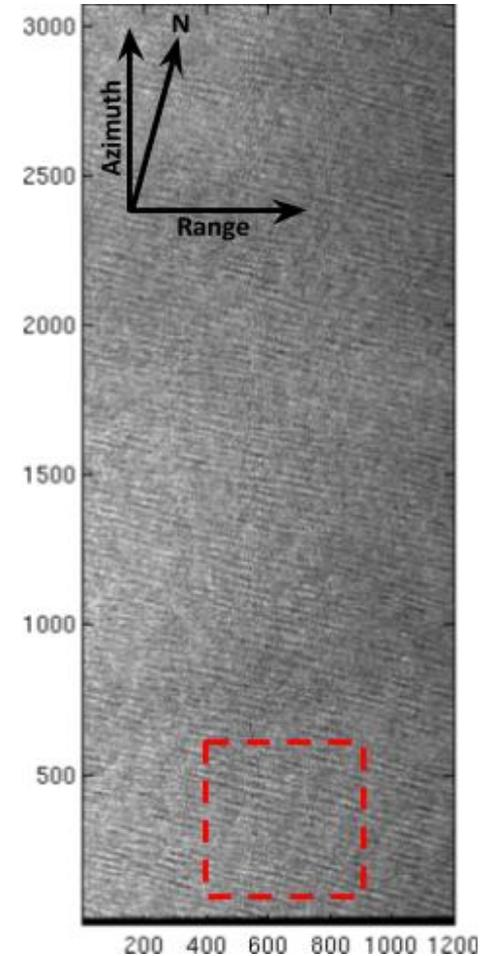
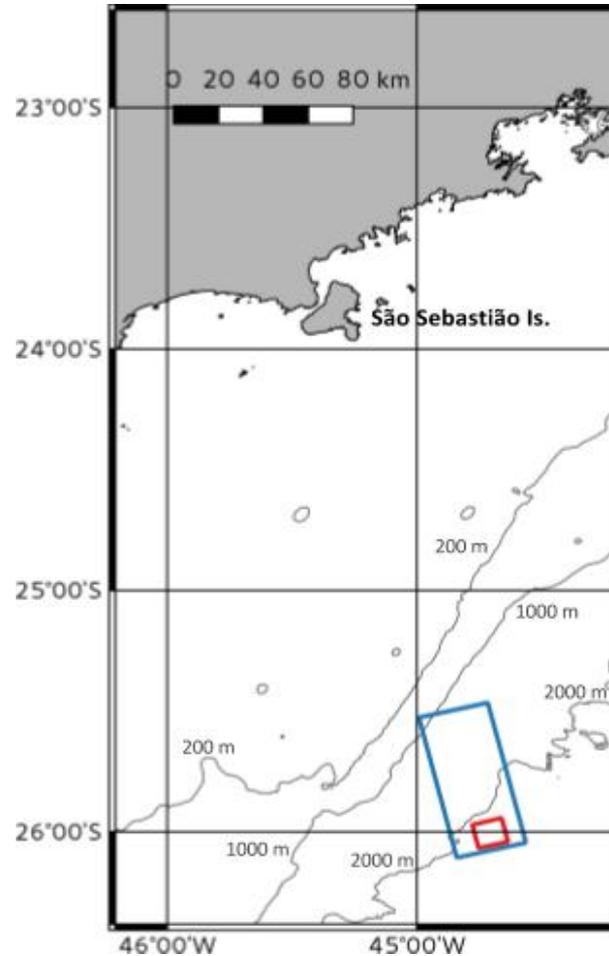
id *ALPSRP171396670*

Alguns resultados preliminares para a costa SE do Brazil

1) Data

1.1 Satellite data:

ALOS
PALSAR
13-april-2009
01:56Z



Alguns resultados preliminares para a costa SE do Brazil

1) Dados

1.2 Resultados de modelagem de ondas:

Modelo: WaveWatch, com parameterização dos termos fonte ST4

- **domínio:** global,
- **resolução:** 0.5 graus na direção N&S
- **número de pontos:** 720 X 315
- **resolução espectral:** 25 frequências, com $f_1 = 0.04177$ Hz, $f_2 = f_1 * 1.1$, etc.
 $f(n+1)=f(n)*1.1$
- **resolução direcional :** 24 direções, cada 15 graus

Ventos

- NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) ventos à 10-m, disponíveis para 1979 - 2010,
- resolução espacial ~ 38 km
- disponível cada uma hora

Alguns resultados preliminares para a costa SE do Brazil

2) Metodologia

2.1 Passos do processamento das imagens

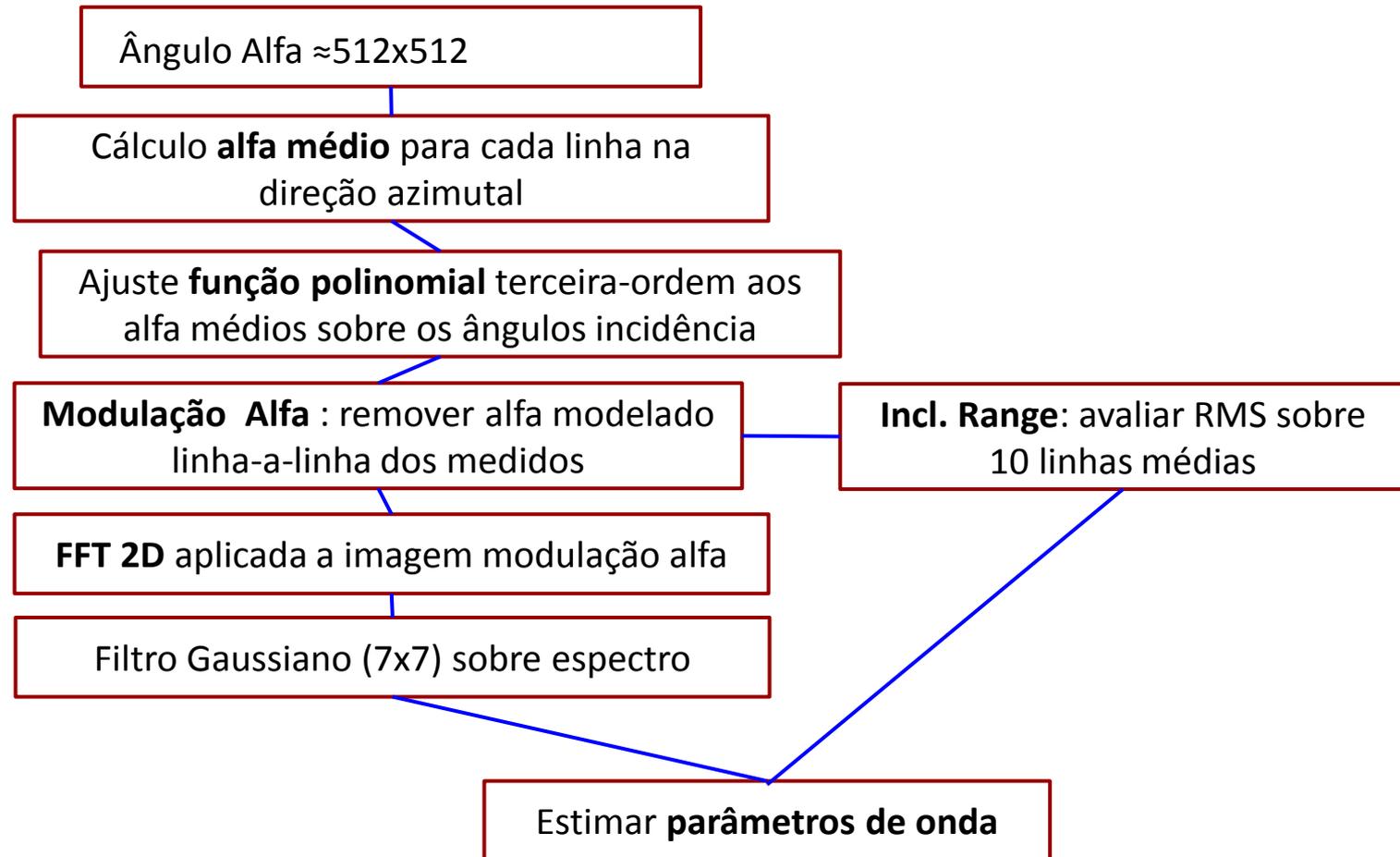


Alguns resultados preliminares para a costa SE do Brazil

2) Metodologia

2.2 Processamento polarimétrico para estimação de parâmetros de onda

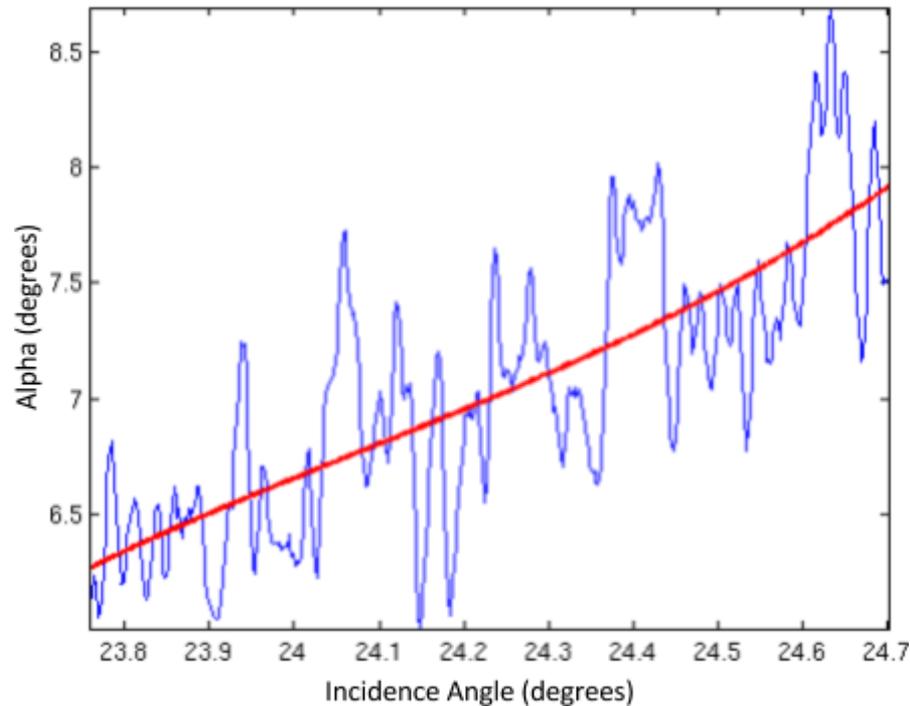
Abordagem Cloude-Pottier



Alguns resultados preliminares para a costa SE do Brazil

2) Resultados

2.3 Resultados do Processamento Polarimétrico

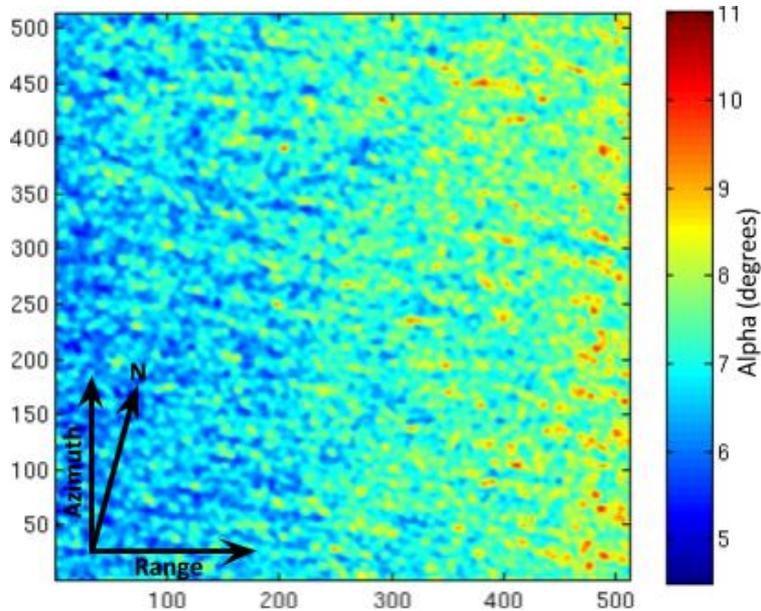


Ângulos Alfa como função do ângulo de incidência e ajuste polinomial 3ª ordem usada no cálculo das modulações ângulo alfa

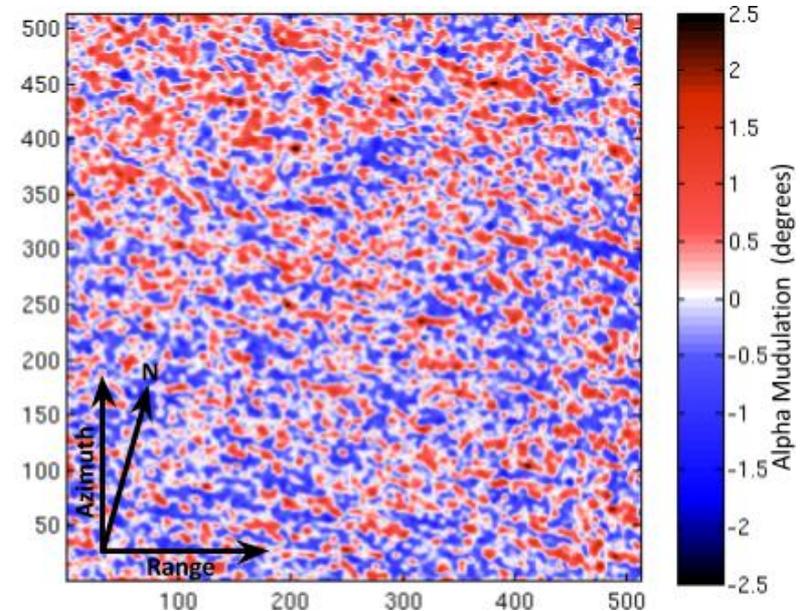
Alguns resultados preliminares para a costa SE do Brazil

2) Resultados

2.3 Resultados Processamento Polarimétrico



Ângulos Alfa para imagem escolhida

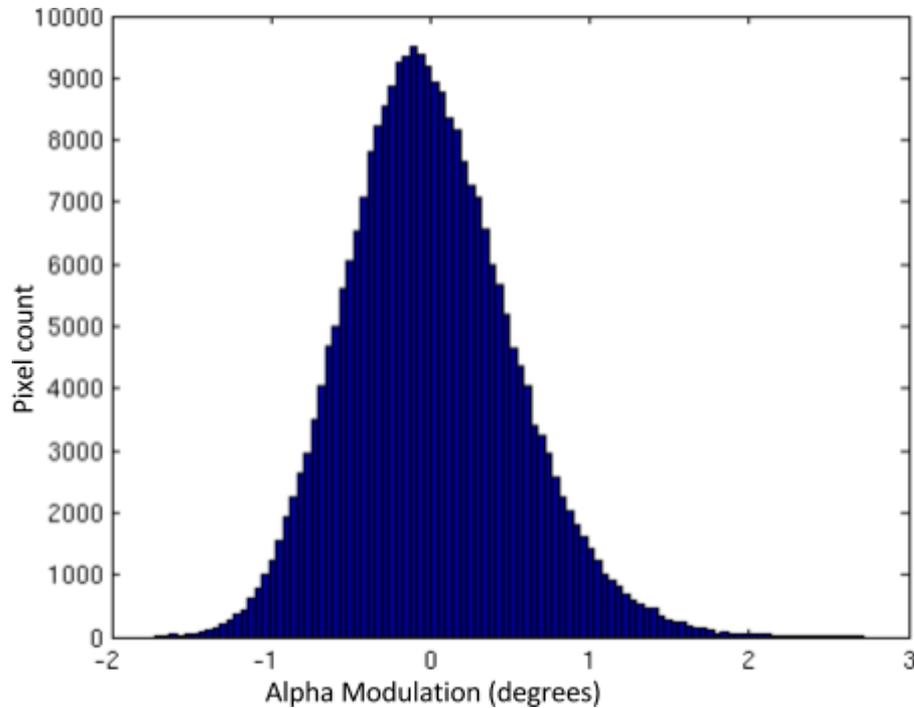


Modulações ângulo Alfa

Alguns resultados preliminares para a costa SE do Brazil

2) Resultados

2.3 Resultados Processamento Polarimétrico

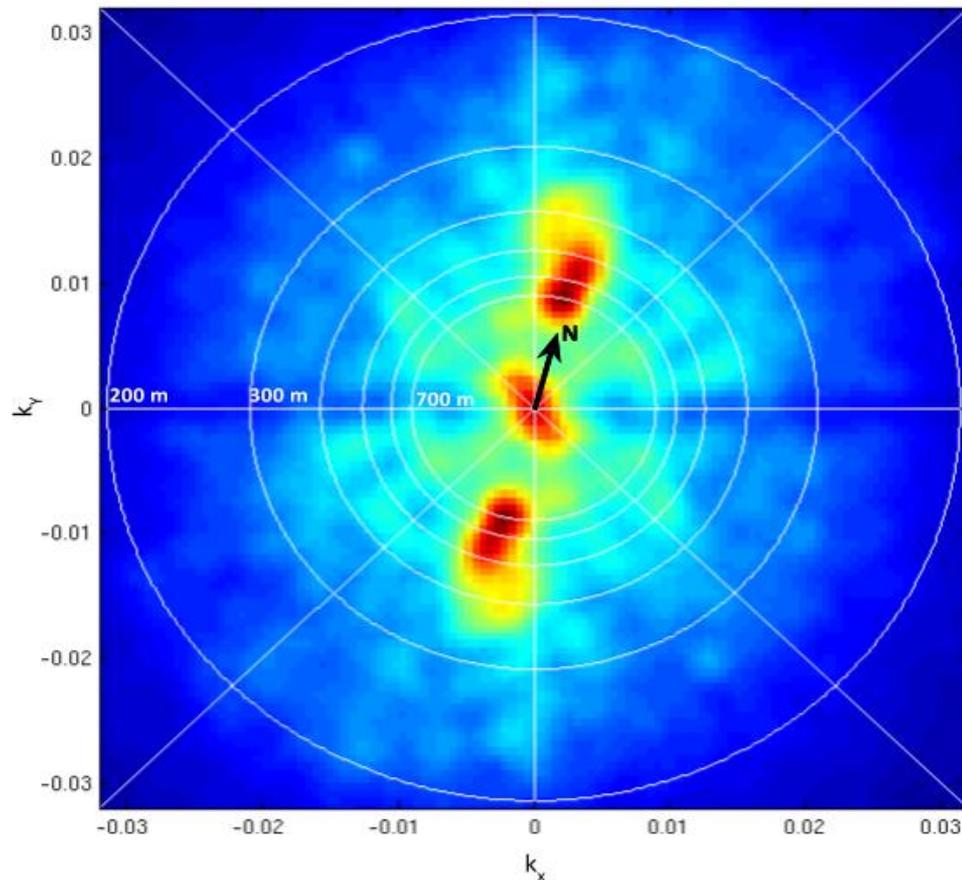


Histograma das Alpha angle

Alguns resultados preliminares para a costa SE do Brazil

2) Resultados

2.3 Resultados Processamento Polarimétrico

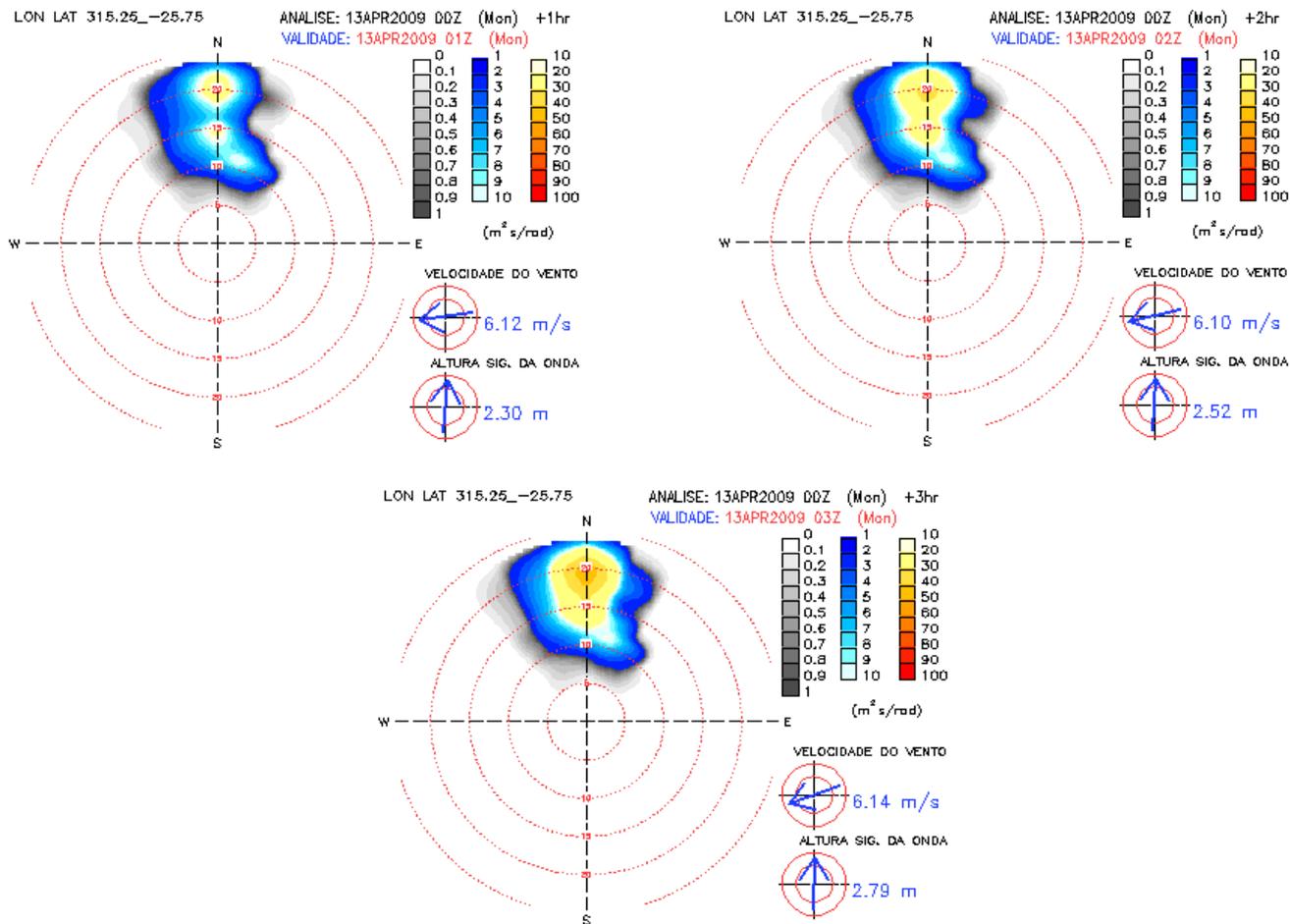


Espectro direcional filtrado Gaussiano FFT das modulações ângulo Alfa

Some preliminary results for SE coast of Brazil

2) Results

2.4 Wave Watch modelling results



Wave Watch directional frequency spectra for -1, 0, +1 h and center position of ALOS imagette

Some preliminary results for SE coast of Brazil

2) Results

2.5 Comparing PolSAR with Wave Watch modelling results

Using the deep water dispersion relation to convert from frequency to wavelength and vice-versa, the following results were obtained:

	Wave watch	ALOS PolSAR
Peak frequency	20 s	21 s
Peak wavelength	624 m	690 m
Propagation direction	180°	183°
$H_{1/3}$	2.52 m	
H_{rms}		2.2 m
Alfa slope rms		0.363°

$$H_{rms} = \tan \alpha_{rms} \times \frac{\lambda}{2}$$

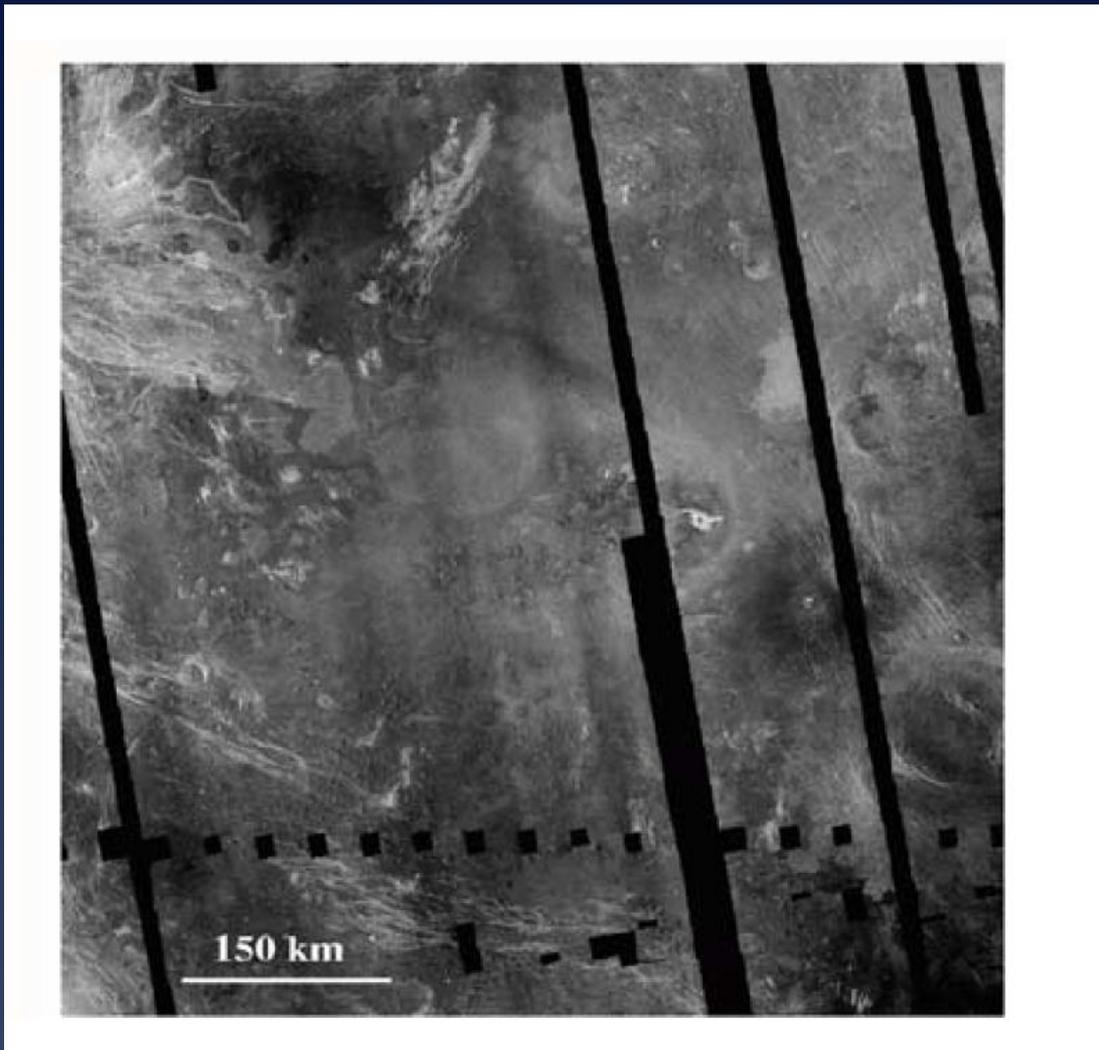


Fig. 1. Image on the left maps the *degree of linear polarization* (0–0.18) associated with the crater Neline on Venus. The Magellan HH-polarized SAR image is shown on the right for comparison. (Reproduced with permission, courtesy L. Carter).

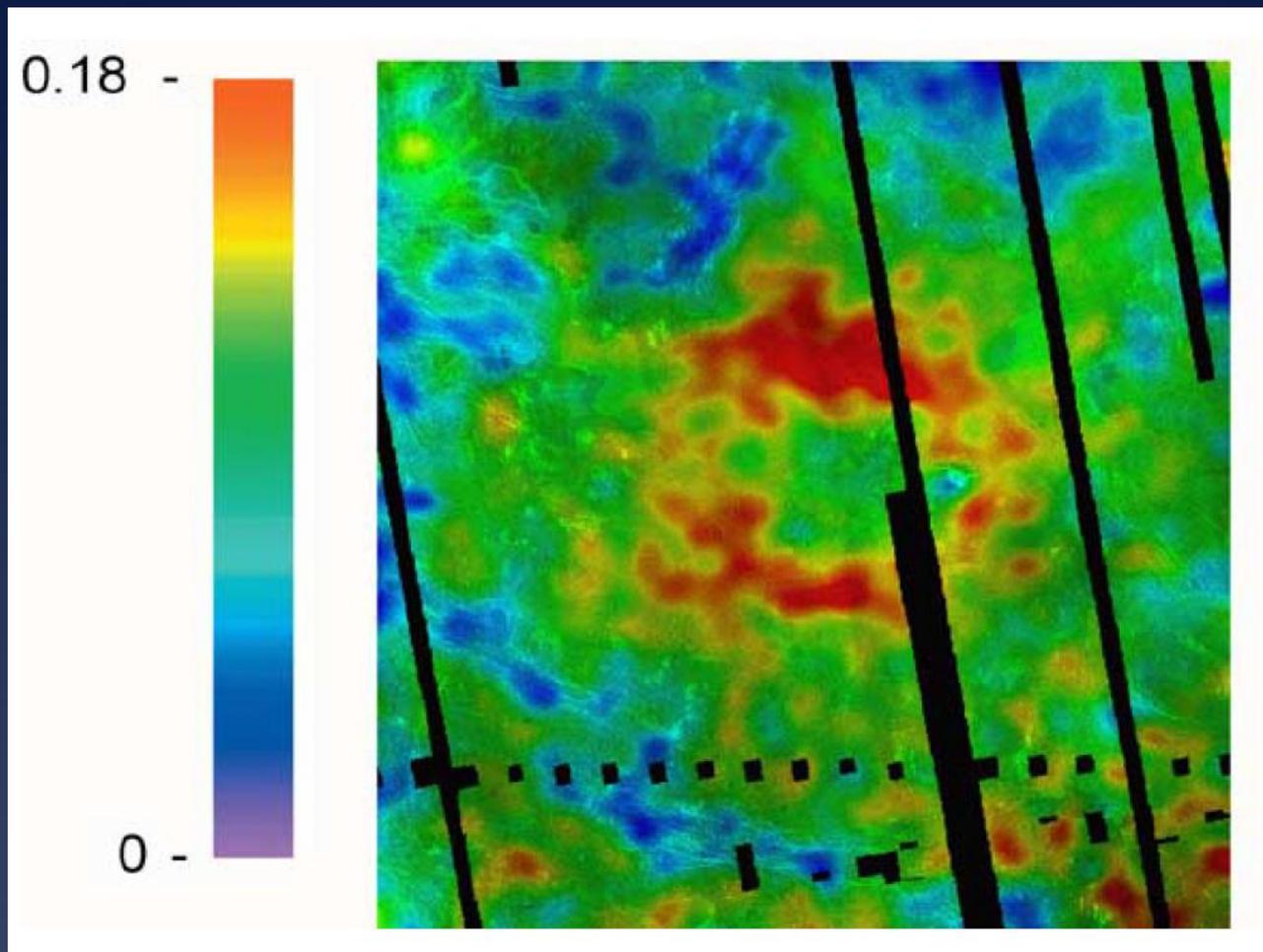


Fig. 1. Image on the left maps the *degree of linear polarization* (0–0.18) associated with the crater Neliike on Venus. The Magellan HH-polarized SAR image is shown on the right for comparison. (Reproduced with permission, courtesy L. Carter).

Obrigado