

Análise da relação de retroespalhamento do sensor ALOS-PALSAR com descritores de macro e micro-topografia: estudo de caso no platô mineralizado em ferro de N1 (Carajás - Pa)

Arnaldo de Queiroz da Silva¹
Waldir Renato Paradella¹
Corina da Costa Fretas¹
Camilo Daleles Rennó¹
Cleber Oliveira Gonzales¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
arnaldo; cleber{ @dsr.inpe.br}; waldir @ ltid.inpe.br;
corina; camilo{ @dpi.inpe.br}

Abstract

The establishment of relationships between radar backscattering and statistical descriptors of the micro-topography (H_{RMS} = the standard deviation of the surface height variation and L_c = the surface correlation length) has been investigated in many papers in the characterization of geologic terrains. In this article, beyond of those two surface roughness parameters, the relationships of the macro-topography (elevation, slope and aspect) are also investigated in relation to SAR responses (σ^0) extracted from ALOS-PALSAR images (FBD-Fine Beam Dual mode) recently acquired on ascending and descending orbits in Carajás Mineral Province (Pará state). The study area for the investigation was the N1 plateau, an iron ore deposit located within the Province, which shows distinct iron-mineralized laterites (hematite, iron-ore duricrust and duricrust). The research was based on the use of linear regression analyses, which demonstrated that H_{RMS} was the parameter with a closer relationship with σ^0 , following by slope. The R^2 values for simple linear regression models between σ^0 and H_{RMS} also showed that H_{RMS} has similar relationship with L-HH for ascending or descending orbits, while H_{RMS} was more sensitive to cross-polarization (L-HV) under ascending pass. The use of multiple regression models involving all of the micro and macro-topography parameters (H_{RMS} , L_c , elevation, slope and aspect) emphasized the secondary importance of L_c for the images in descending orbit and aspect for scenes acquired on ascending orbit.

Palavras-chave: ALOS-PALSAR, rugosidade superficial, sigma zero, macro e micro-topografia, geologia, Carajás

1. Introdução

O sensoriamento remoto de imageamento ativo experimenta um momento favorável de desenvolvimento e aplicação com os lançamentos de novos sensores orbitais a exemplo dos PALSAR/ALOS, RADARSAT-2, TERRASAR-X que operam respectivamente nas bandas L, C e X. Esses sensores são capazes de adquirir dados em múltiplas polarizações além de dados polarimétricos, com expressiva melhora na resolução espacial.

A disponibilidade destes novos produtos de radar desafia pesquisadores a aprimorarem as técnicas de processamento para diferentes aplicações. Um dos aspectos que merece atenção é utilizar adequadamente a capacidade dos novos sensores em fazer aquisições em diferentes configurações de geometria de aquisição. Particularmente para aplicações geológicas, este é um recurso importante já que o relevo é um dos principais elementos da paisagem utilizado na compreensão do arranjo espacial das estruturas geológicas. O realce das feições topográficas é estritamente dependente da relação entre o *trend* dos lineamentos com a direção de apontamento

do sensor, sendo favorável o arranjo em que a iluminação do alvo é ortogonal à direção preferencial das estruturas.

A interação das ondas eletromagnéticas com os alvos é controlada pelas propriedades físicas deste último, expressa por dois parâmetros: a rugosidade, que é uma medida relativa da variação textural da superfície, dependente do comprimento de onda e do ângulo de incidência; e a constante dielétrica, que tem relação com a capacidade do meio material em interagir com a onda seja pela reflexão, absorção ou transmissão. Este parâmetro é estritamente dependente do conteúdo de água contido no alvo. Muitos estudos têm sido desenvolvidos no sentido de identificar a contribuição individual desses dois parâmetros nos dados obtidos por imagem de radar, porém muitas incertezas ainda persistem.

Assim, a capacidade dos novos sensores em adquirir dados em órbitas ascendente e descendente, em mais de uma polarização, é o mote que justifica este estudo. A pesquisa foi conduzida no sentido de estabelecer a relação entre o parâmetro sigma zero, extraído das imagens PALSAR/ALOS, modo *Fine Beam Dual* (FBD), com cinco parâmetros topográficos, que podem ser agrupados em parâmetros de microtopografia (variação da rugosidade vertical, medida por meio da raiz quadrada do erro médio da altura – Hrms; e a correlação lateral da altura - Lc) e de macro topografia expressa pela declividade, aspecto e elevação, parâmetros estes extraídos do Modelo Digital do Terreno – MDT.

2. Área de estudo

A área de estudo está localizada em um dos platôs que compõem os depósitos de ferro da Província Mineral de Carajás, no estado do Pará, identificado como N1 (Figura 01). O platô N1 constitui parte de uma série de platôs relacionados à seqüência meta-vulcânica e meta-sedimentar do Grupo Grão Pará, da qual faz parte a Formação Carajás, que compreende camadas e corpos lenticulares descontínuos de jaspelitos, e lentes de hematita compacta, entremeada por soleiras e diques de rochas básicas, principalmente no domínio setentrional da Serra dos Carajás, onde ocorrem os corpos de minério mais espessos e economicamente importantes (Figueiredo e Silva, 2004). Este platô é capeado por uma espessa e dura crosta laterítica ferruginosa desenvolvida sobre rochas vulcânicas e ferríferas, com uma área de 24 km² e altitude de aproximadamente 700 m, coberto por uma vegetação do tipo savanítico, que na paisagem regional contrasta com uma floresta ombrófila densa de entorno (Morais et al., 2007).

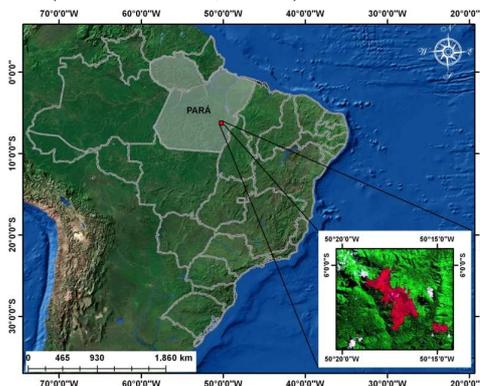


Figura 01 – Localização do platô N1

O platô N1 é ligeiramente orientado a N-NW, cujo controle estrutural é devido a várias ramificações lítricas do tipo *splay*, de orientação N-S, relacionadas a falha transcorrente Carajás (Holdsworth & Pinheiro, 2000). Na porção oriental de N1, ocorrem relevos colinosos que são sustentados por hematitos laminados - HDL principal minério de ferro com concentração da ordem de 64% (Figuereido e Silva, 2004) e crostas de minério que são formações lateríticas derivadas do HDL, normalmente com altas concentrações em ferro e que estão topograficamente abaixo dos HDL, presente nas encostas das colinas. Estas duas unidades litológicas ocorrem associadas também em pontos localizados no centro e a noroeste do platô, porém, com relevos menos expressivos. Grande parte do relevo do platô é constituído por superfícies planas que se estendem a norte e a leste e marcam o domínio da terceira principal unidade litológica, definida como crosta laterítica que é o produto de alteração química de rochas básicas que são as encaixantes dos depósitos ferríferos.

3. Material e métodos

As imagens utilizadas foram adquiridas pelo sensor orbital PALSAR/ALOS, que opera na banda L e possui diferentes modos de aquisição. Para este estudo utilizou-se duas imagens adquiridas no modo *Fine Beam Dual* (FBD), com nível de processamento 1.5, sendo uma adquirida em órbita ascendente e outra descendente, ambas com número de *looks* igual a 4. As principais características das imagens estão expressas na Tabela 01.

Tabela 01 – Característica das imagens ALOS/PALSAR, modo FBD 1.5

Cenas	Ângulo de incidência	Polarização	Resolução	Órbita (az. de visada)	Data de aquisição
ALPSRP076437060	39,019°	HH e HV	12,50 x 12,50	Ascend. (78°)	2007/07/02
ALPSRP080153740	38,954°	HH e HV	12,50 x 12,50	Descend. (282°)	2007/07/27

Na geração das imagens sigma zero, a partir das imagens de amplitude, o primeiro passo foi a conversão dos dados do formato CEOS para o formato PIX, que é o formato do software PCI Geomática V10.1.3 utilizado para os processamentos das imagens. Em seguida, aplicou-se um filtro para redução do ruído *speckle* (Frost, janela 7x7). A conversão de amplitude para sigma zero foi realizada aplicando a Equação (Rosenqvist et al., 2007): $\sigma^0 = 10 \cdot \log_{10} (DN^2) + CF$, onde DN é o nível de cinza (*Digital Number*) da imagem em amplitude e CF, o fator de conversão para o dado em amplitude cujo valor para o tipo de imagem em uso é -83.

O passo seguinte consistiu em ortorretificar as imagens sigma zero. Para isto, utilizou-se o método *Specific Model*, do PCI Geomatica OrtoEngine V10.1.3, que permite corrigir geometricamente as imagens PALSAR apenas com as informações precisas de atitude e efemérides do satélite. O DEM utilizado na ortorretificação foi o SRTM3 que de acordo com Oliveira & Paradella (2008) possui precisão altimétrica, expressa em valor de Erro Médio Quadrático (EMQ), de 12 m para região de relevo montanhoso, compatível com escala 1:100.000. Já o EMQ planimétrico das imagens ortorretificadas foi calculado a partir de 21 pontos de validação, coletados em campo com equipamentos GPS Geodésicos, resultando no valor de 41,41 m. Em seguida, as imagens ortorretificadas foram reamostradas para 60 m, utilizando um filtro de média com janela 5x5. Considerando que o Erro Circular com 90% de

probabilidade - CE90 (Paradella et al., 2005), calculado a partir do valor do EMQ planimétrico, é de 86,95 m, a reamostragem aplicada com valor inferior ao CE90 é justificada pelo compromisso de manter a melhor resolução radiométrica das imagens sigma zero. Para cada ponto de rugosidade medido em campo, foi realizada a leitura do valor de sigma zero da imagem, permitindo a composição de uma tabela de dados para subsequente análise estatística.

Foram selecionados 74 pontos distribuídos sobre as diferentes unidades litológicas N1, onde foram realizadas medidas de rugosidade, em trabalho de campo realizado em junho de 2008. A metodologia adotada para o cálculo da rugosidade da superfície do terreno é conhecida como *meshboard* (Mattia et al., 2003), a qual envolve a inserção no solo de uma placa esquadrinhada com 1,2 metro de comprimento e *grid* de 2 cm de intervalo entre as linhas horizontais e verticais, para em seguida ser fotografada. O natureza isotrópica do terreno foi investigada previamente com realizações de três medidas de rugosidade na direção ascendente (Az. 78°) e três na direção descendente (Az. 282°). Análises baseadas na regressão linear dos valores de Hrms com os valores de sigma zero revelaram que não há razão para supor o caráter anisotrópico do terreno. A partir deste resultado, o procedimento para cada ponto foi registrar seis perfis dispostos sequencialmente, correspondendo a um transecto final de 7,20 m.

Um programa estruturado em linguagem IDL, denominado de *Roughness*, foi desenvolvido por Rennó (2008) que permite, a partir da digitalização do perfil de solo nas fotografias tomadas em campo, calcular dois parâmetros de rugosidade: a raiz do quadrado médio da variação vertical do perfil (Z_i) – Hrms, dado pela Equação 01 (Ulaby et al., 1978); e a correlação lateral da variação vertical do perfil – LC, expressa pela Equação 02 (Ulaby et al., 1978). O LC fornece uma referência para estimar a independência estatística de dois pontos na superfície. Dois pontos separados por uma distância x' , para qual a função de auto-correlação $\rho(x')$ é igual a e^{-1} , possuem suas alturas estatisticamente independentes uma da outra (Singh et al., 2003).

$$Hrms = \left[\frac{1}{N-1} \left(\sum_{i=1}^N (Z_i)^2 - N(\bar{Z})^2 \right) \right]^{1/2}, \text{ onde } \bar{Z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i \quad (\text{Eq. 01})$$

$$\rho(x') = \frac{\sum_{i=1}^{N+1-j} Z_i Z_{j+i-1}}{\sum_{i=1}^N Z_i^2} \quad \rho(Lc) = \frac{1}{e} \quad (\text{Eq. 02})$$

Os parâmetros de macro topografia foram extraídos de um Modelo Digital de Terreno – MDT, elaborado a partir de dados de aerolevanteamento, em escala 1:10.000, fornecido pela Companhia Vale. Os parâmetros extraídos do MDT foram a Declividade do terreno, a Elevação e o Aspecto, ou seja, o azimute de maior declividade do terreno.

Por fim, foi organizada uma planilha contendo os dados para cada um dos 74 pontos de Hrms, Lc, Declividade, Aspecto e Elevação, além de valores de sigma zero para as polarizações HH e HV das imagens ascendente e descendente. As análises estatísticas geradas a partir desta planilha compõem os resultados que serão apresentados e discutidos na seção seguinte.

4. Resultados e Discussões

Considerando que o objetivo do estudo é investigar a relação entre o valor de sigma zero com os parâmetros da topografia, o ponto de partida da análise foi a matriz de correlação (Tabela 02). Algumas transformações foram aplicadas nas variáveis no sentido de aumentar a correlação entre elas, e os melhores resultados foram obtidos com o logaritmo das variáveis Hrms, declividade e elevação, mantendo as demais variáveis sem transformação. Observando os valores desta Tabela, fica evidente que o parâmetro Hrms é o que mantém as maiores correlações com os valores de sigma zero, seguidos da declividade, elevação, LC e aspecto. Na nomenclatura adotada para identificar as imagens, SIG indica que a imagem está discretizada em valores de sigma, D e A indicam as órbitas descendente e ascendente, respectivamente, e HH e HV as polarizações das imagens.

Tabela 02 - Matriz de correlação entre os valores de sigma zero e parâmetros da topografia

	ln_Hrms	ln_Declividade	ln_Elevação	Lc	Aspecto
SIG_3740D_HH	0,66	0,39	0,33	0,26	-0,09
SIG_3740D_HV	0,52	0,39	0,27	0,18	-0,00
SIG_7060A_HH	0,63	0,41	0,30	0,29	0,13
SIG_7060A_HV	0,59	0,45	0,27	0,33	0,12

Analisando o BOXPLOT dos parâmetros da topografia (Figura 05), agrupados nas três classes de rochas em estudo, fica evidente que o Hrms é o parâmetros que melhor individualiza a canga laterítica das classes Hematita e canga de minério, que são dentro de um contexto mapeamento geológico, as classes de interesse econômico.

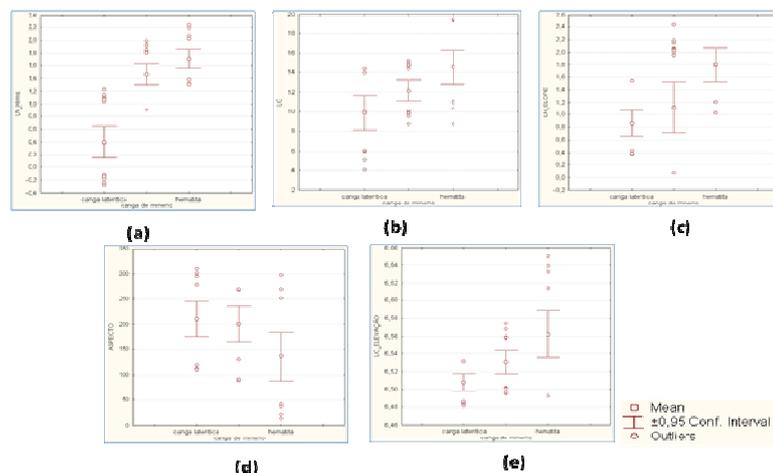


Figura 02 – BOXPLOT do parâmetro da topografiada topografi: a) Hrms; b) LC; c) ln_inclinação; d) Aspecto; e) ln_elevação

Para analisar melhor as relações entre Hrms e sigma zero foram geradas regressões lineares simples mostradas na Figura 03. Cada grupo de rocha foi identificado por uma cor diferente para ajudar a visualizar o nível de agrupamento das rochas.

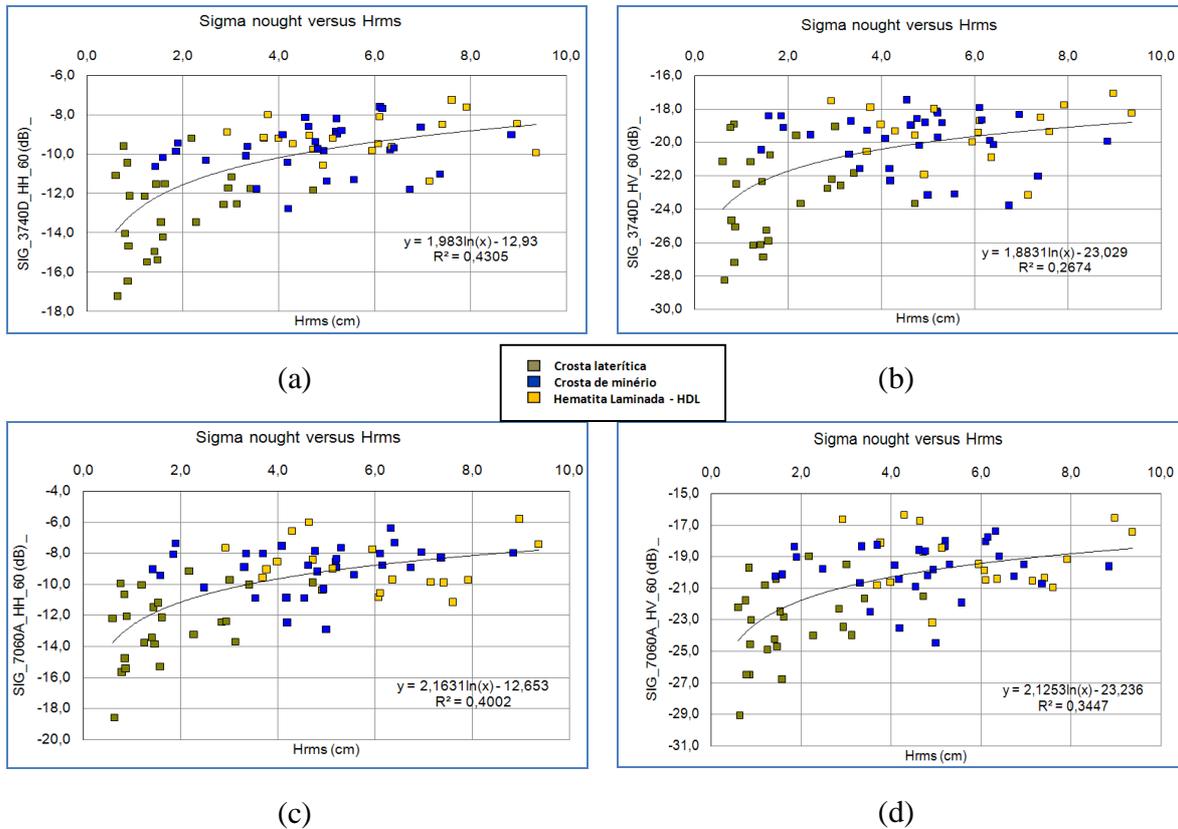


Figura 03 – Scatterplots das regressões lineares entre os valores de sigma zero extraídos das imagens FBD e o parâmetro Hrms (a) HH_desc; (b) HV_desc; (c) HH_asc; (d) HV_asc

Os valores do coeficiente de determinação R^2 indicam que as melhores relações são obtidas com as imagens em polarização HH, sendo irrelevante a orientação da órbita. No entanto, para a polarização HV, a orientação de visada do sensor parece interferir no valor da regressão, mostrando que a visada ascendente acentua a relação entre rugosidade e sigma zero, para o caso estudado. A princípio, poder-se-ia considerar que essa diferença seria explicado por diferenças nas taxas de precipitação registradas na véspera das aquisições, haja vista essa polarização responder mais a constante dielétrica (Blanchard et al., 1982). No entanto, de acordo com dados da estação meteorológica da cidade de Canaã dos Carajás, distante 67 km de N1, uma semana antes da aquisição, os valores de precipitação acumulada registrados foram semelhantes para as duas datas de aquisição, da ordem de 1 mm. Outra hipótese a se considerar, poderia estar relacionada com um certo controle direcional do relevo que de alguma forma poderia interferir na interação da polarização cruzada.

Para investigar essa hipótese, analisou-se a contribuição individual dos parâmetros da topografia com os valores de sigma zero, através de modelos de regressão linear múltipla considerando diferentes combinações das variáveis independentes. Os gráficos da Figura 04 mostram os modelos com maiores valores de R^2 e suas respectivas variáveis preditivas. Outro procedimento aplicado para seleção de variáveis para o modelo de regressão foi o método

Mellow CP. Os resultados desses métodos convergiram para a importância dos parâmetros \ln_{Hrms} e $\ln_{inclinação}$ quaisquer que sejam a direção de visada e polarização. Secundariamente, para a órbita descendente, a variável mais significativa é o LC, enquanto para a órbita ascendente importa mais o Aspecto. Este último resultado reforça a hipótese do controle direcional do relevo na interação da polarização HV.

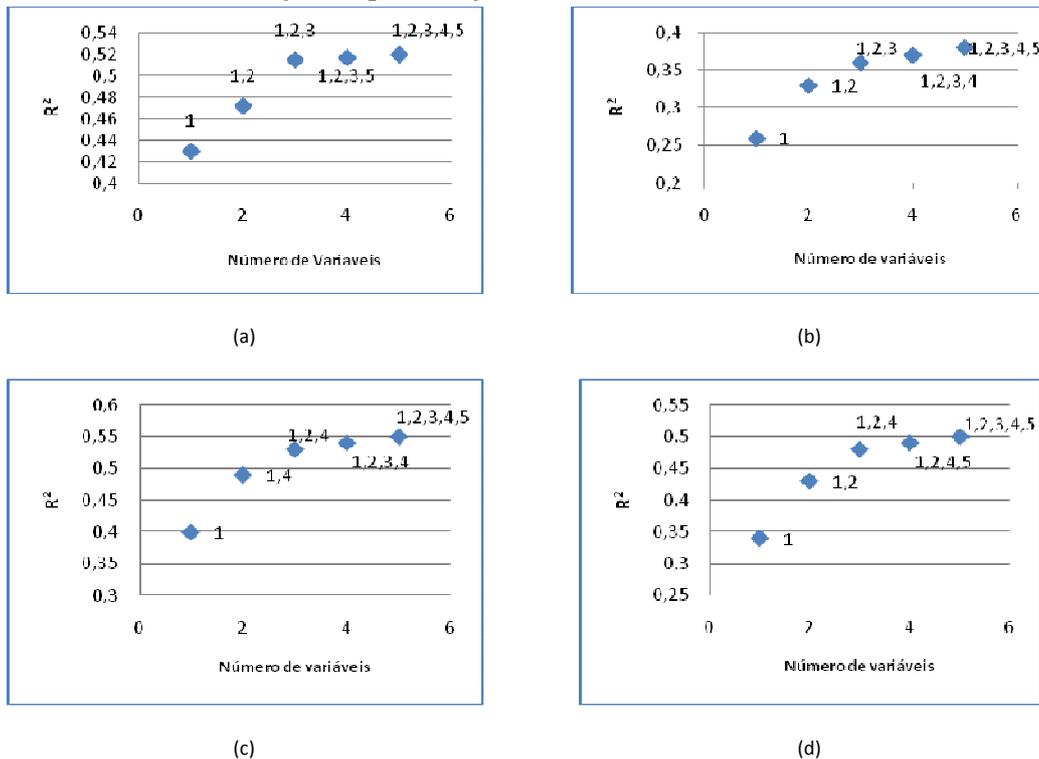


Figura XX – Definição dos parâmetros para modelos de regressão linear considerando o critério de seleção de variáveis baseada no valor de R^2 : (a) HH_D; (b) HV_D; (c) HH_A; (d) HV_A (Legenda: 1 → \ln_{Hrms} ; 2 → $\ln_{declividade}$; 3 → LC; 4 → Aspecto; 5 → $\ln_{elevação}$)

A Tabela 03, mostra os valores de beta (parâmetros b normalizados) e seus respectivos valores-p, para os modelos de regressão múltipla selecionados para cada uma das imagens sigma zero. A influência do parâmetro Hrms em todos os modelos fica evidente assim como a equivalência entre os outros parâmetros dentro dos modelos. O valor negativo do parâmetro LC pode ser explicado pela colineariedade entre este parâmetro e Hrms.

Tabela 03 – Significância dos parâmetros topográficos com as imagens sigma zero indicados pelo X.

	\ln_{Hrms}	$\ln_{Declividade}$	Lc	Aspecto	$\ln_{Elevação}$
HH_D	0,757 (0,000)	0,210 (0,000)	-0,250] (0,019)	-	-
HV_D	0,589 (0,000)	0,218 (0,000)	-0,235 (0,060)	-	-
HH_A	0,640 (0,000)	0,210 (0,017)	-	0,280 (0,001)	-
HV_A	0,569 (0,000)	0,270 (0,003)	-	0,250 (0,006)	-

5. Conclusões

Os resultados obtidos neste estudo mostraram que entre os parâmetros da micro-topografia, o Hrms é o que mantém maior relação de dependência com os valores de sigma zero, calculados a partir de imagens FBD do sensor PALSAR/ALOS. Os valores de LC, por outro lado, apresentaram baixa correlação com sigma zero, isto porque este parâmetro mostra grande variabilidade o que torna pouco confiável para construções de modelos envolvendo retroespalhamento (Verhoest et al., 2008). Os modelos de regressão linear entre Hrms e os valores de sigma zero revelaram que a polarização HH tem maior relação com o Hrms, não importando se a órbita é ascendente ou descendente. Por outro lado, a relação do Hrms com a com a polarização HV é influenciada pela direção de visada, mostrando que na área estudada, é maior na direção da órbita ascendente. A análise dos parâmetros de macro topografia, através de modelos de regressão múltipla, demonstrou que o Aspecto do relevo é significativo para as imagens de visada ascendente, o que pode explicar a melhor resposta da polarização cruzada para esta geometria de apontamento. O arranjo estrutural da área, caracterizada por lineamentos NNW-SSE pode ter relação com este resultado.

Agradecimentos: os autores agradecem à JAXA (ALOS RA # 219) e ao CNPq pelos recursos de projeto de pesquisa (Bolsa P&D) do segundo autor (Processo # 300985/90-8).

Citações e Referências

- Blanchard, A. J.; Newton, R. W.; Tsang, L.; Jean, B. R. Volumetric effects in cross-polarized airborne radar data. **IEEE Trans. Geoc. Remote Sensing**, v. 20, n. 1, 36-41, Jan. 1982.
- Figueiredo e Silva, R. C. **Caracterização petrográfica e geoquímica de jaspelitos e minério de ferro dos depósitos N1 e N4W, N4E e N5E, Província Mineral de Carajás, Pará: implicações para a mineralização de ferro.** Dissertação (Mestrado em Geologia) – UFMG, 2004.
- Morais, M.C.; Pereira Junior, P.M., Paradella. Potencial of SAR data (L-hh-hv-vv) to discriminate iron-mineralised laterites in the region Amazon (Carajás Province) based on textural attributes. In **XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis**, 21-26 abril 2007, p.2069-2078.
- Oliveira, C. G. & Paradella, W. R. Na assessment of the altimetric information derived from spaceborne SAR (RADARSAT-1, SRTM3) and optical (ASTER) data for cartographic application in the Amazon region. **Sensors**, 8, 3819-3829, 2008.
- Paradella, W. R.; Cecarelli, I. C.F.; Luiz, S.; Oliveira, C.G.; Okida, R. Geração d carta topográfica com estéreo-pares fine do RADARSAT-1 e dados ETM+ LANDSAT 7 em ambiente de relevo montanhoso na região amzônica (serra dos Carajás, Pará). **Revista Brasileira de Geologia**, vol. 35, n.3, p. 323-332, 2005.
- Rosenqvist, A.; Shimada, M.; Ito, N.; Watanabe, M. ALOS PALSAR: A Pathfinder Mission for Global-Scale Monitoring of the Environment. **IEEE Trans. Geoc. Remote Sensing**, vol. 45, no. 11, nov., pg. 3307-3316, 2007.
- Singh, D.; Singh, K.P.; Herlin, I.; Sharma, S.K. Ground-based scatterometer measurements of periodic surface roughness and correlation length for remote sensing. **Advances in Space Research**, vol. 32, n. 11, p. 2281-2286, 2003.
- Verhoest, N. E. C.; Lievens, H.; Wagner, W.; Alvarez-Mozos, J.; Moran, M.S.; Mattia F. On the soil roughness parametrization problems of bare surface from SAR. **Sensor**, vol. 8, p.4213-4248, 2008
- Ulaby, F. T.; Moore, R. K.; Fung, A. K. Microwave remote sensing: active and passive. Artech House: Boston, MA, 1982; vol. II.