

Metodologia de Controle de Qualidade: Validação e Calibração de dados de Radar Interferométrico de Abertura Sintética Aerotransportado: estudo de caso, Cia. Mineração Rio do Norte

Dr. Everton Valiati Hemerly¹
Fernanda Rocha Lourenço¹
Iara Lício¹

¹ Orbisat da Amazônia Indústria e Aerolevantamentos S/A
Caixa Postal 96 - 12244-000 – São José dos Campos - SP, Brasil
{everton.valiati, fernanda.lourenço, iara.licio}@orbisat.com.br

Abstract: This work shows the applied quality assurance methodology to calibrate and validate the InSAR products from the Mineradora Rio do Norte (MRN) Project, in which was used the airborne Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR). This project involve an area of 1430 km². Being that, the final objective was to execute a systematic mapping, without influence of the vegetal covering in the areas of the Amazonian humid tropical forest, using the combination of bands X and P. In this article, we show the validation results and hillshade chart only for the Digital Surface Modeling- DSM. The MRN will use the InSAR data to plan and execute It's bauxita mines exploration in the Amazon Rain Forest.

Palavras-chave: remote sensing, sintetic aperture radar, quality assurance, validation, aplicacions, sensoriamento remoto, radar de abertura sintética, controle de qualidade, validação, aplicações.

1. Introdução

Os Sistemas de Informações Geográficas, SIG's, direcionados a Projetos de engenharia, estão sendo intensamente utilizados para o reconhecimento e mapeamento de diferentes áreas do planeta. Entretanto, embora exista uma enorme quantidade de dados geográficos disponíveis para a maioria das regiões do globo terrestre, estes dados, até certo ponto, podem ser considerados de baixa qualidade com relação a sua precisão, exatidão e resoluções: geométrica, radiométrica e temporal. A dificuldade de obtenção de dados de alta qualidade, na maioria das vezes, está relacionada com a falta de investimentos e/ou com fenômenos naturais, tais como: a existência de intensa e contínua cobertura de nuvens e de densas florestas, principalmente nas regiões úmidas compreendidas entre os trópicos, por exemplo, a Região Amazônica.

Sendo assim, em países tropicais como o Brasil, entre as tecnologias de mapeamento existentes, por exemplo, os levantamentos topográficos e geodésicos, a fotogrametria clássica e o LIDAR: *Light Detection And Ranging*, a mais recente e promissora tecnologia de aquisição de dados terrestres por interferometria (InSAR) está sendo cada vez mais utilizada. Os dados de sensores remotos têm sido, nas últimas duas décadas, testados como uma ferramenta com grande potencial de uso. Principalmente, nas seguintes áreas de pesquisa: cartografia, agricultura, meio ambiente, hidrologia, geologia, etc. O desenvolvimento de sensores capazes de coletar informações em diferentes porções do espectro eletromagnético, e pela evolução computacional na aquisição e processamento de dados digitais, como por exemplo, o uso de sistemas sensores ativos, radar. A principal vantagem do radar é a sua capacidade em adquirir imagens independentemente da presença de nuvens ou de fumaça.

As aquisições de dados terrestres por interferometria são particularmente importantes, pois a metodologia InSAR é capaz de fornecer uma grande quantidade de informações, em qualquer condição atmosférica, como na presença de nuvens e/ou fumaça, mesmo durante a noite. O curto período de tempo necessário para a coleta de dados é uma outra atrativa vantagem de se empregar esta metodologia na região amazônica e áreas de florestas em geral. Devido à sua intensa cobertura de nuvens durante a maior parte do ano. Nestas regiões,

existem importantes províncias minerais e grande parte da pesquisa em prospecção mineral e mapeamento geológico no Brasil está sendo realizada utilizando-se de dados de radar (Cunha, 1988; Lima, 1988; Lima *et al*, 1990).

2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é apresentar sumariamente a metodologia de calibração e validação dos produtos gerados para o Projeto Mineração Rio do Norte e seus resultados. Apresentamos também exemplos destes produtos: MDS e Orto Imagem da banda X e uma Carta de Sombreamento do relevo com indicações de como estes dados podem ser utilizados para aplicações em geologia, especificamente na exploração mineral.

3. Tecnologia SAR

O termo RADAR deriva do inglês – “RADio Detection And Ranging”, detecção e posicionamento usando faixas de rádio. Existem diferentes tipos de radares, desde os de aproximação em aeroportos, vigilância do espaço aéreo, meteorológicos e também os radares utilizados em Sensoriamento Remoto. Neste caso, apresentaremos a tecnologia dos radares aerotransportados de abertura sintética (SAR).

A Abertura Sintética é o comprimento determinado pelo deslocamento da plataforma durante o intervalo “B”, como mostra a **Figura 1**.

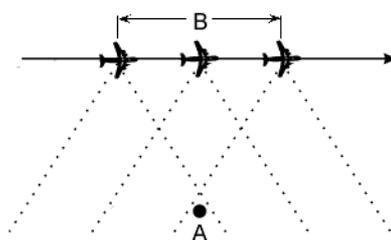


Figura 1: Abertura Sintética.

Onde: A representa o objeto imageado e B representa as posições ocupadas pela antena.

Um RADAR de abertura sintética (SAR) simula uma antena longa, por meio do deslocamento de uma antena (curta) ao longo da direção de vôo da plataforma. As posições sucessivas da antena são tratadas eletronicamente como se fossem elementos de uma única antena longa (Sabins, 1987).

Os objetos são discriminados a partir das modificações na frequência dos ecos em função do movimento relativo entre os objetos no terreno e a plataforma:

- Quando o objeto “entra” no feixe, os ecos têm sua frequência aumentadas (*Doppler* positivo);
- Quando a plataforma está paralela à posição do objeto, não há alteração da frequência (*Doppler* zero);
- Quando a plataforma se afasta, os ecos têm a frequência diminuída (*Doppler* negativo), até que o objeto “saia” do feixe.

A informação de frequência *Doppler* é obtida pela comparação eletrônica do sinal refletido pelo objeto com o sinal de referência do pulso emitido. Os dados brutos são transformados em imagem, sendo que o feixe sintético tem largura constante, fazendo com que a resolução azimutal seja constante. (Gupta, 1991).

O termo *interferometria* é derivado da palavra interferência, que expressa um fenômeno resultante da interação entre ondas de qualquer tipo. Interferometria SAR é basicamente um método que utiliza um par de imagens SAR no formato complexo, de amplitude e fase, para

gerar uma terceira imagem complexa, chamada de imagem interferométrica, cuja fase de cada pixel, dita fase interferométrica, é formada pela diferença de fase entre os pixels correspondentes as duas imagens originais. A fase de cada pixel da imagem interferométrica, durante o processamento, é relacionada com a elevação do terreno, correspondente a célula de resolução na superfície, possibilitando com isso a geração de um Modelo Digital de Elevação.

Neste segmento de radares, encontra-se o sistema de radar interferométrico aerotransportado OrbiSAR-1, desenvolvido, produzido e operado pela Orbisat da Amazônia, Divisão de Sensoriamento Remoto, que apresentou uma nova maneira de mapeamento automatizado, devido ao uso das microondas que enviam e recebem impulsos do sensor.

O OrbiSAR-1 é equipado com duas diferentes bandas (banda X e banda P) que permite a determinação simultânea do modelo digital de superfície (MDS) e do modelo digital do terreno (MDT). Na presença de vegetação densa, os sinais da banda P penetram até o solo. Este novo sistema alcança até uma largura de faixa de 400 MHz, que são gravadas com 160 Mbps.

4. Aplicação dos produtos SAR: Imagens da Banda X e Modelos Digitais de Superfície em Mineração (Projeto Mineração Rio do Norte)

O Projeto Mineração Rio do Norte está localizado em Porto Trombetas, nas proximidades do município de Oriximiná, a 880 quilômetros de Belém, capital do Estado do Pará. A área mapeada é de aproximadamente 1430 km², a qual corresponde a uma grande reserva de bauxita.

O objetivo do mapeamento é compreender melhor a geomorfologia da região onde está localizada a reserva de bauxita, principalmente as bordas dos platôs e os formatos dos vales entre eles.

Os dados de radar são de enorme importância para o reconhecimento geológico, prospecção mineral, e estudos geotécnicos e geoambientais (Singhroy, 1992).

Em geral, nas aplicações geológicas, procura-se integrar dados de alta resolução espacial que realcem aspectos morfológicos do terreno, como é o caso das imagens SAR, com dados que denotem aspectos do comportamento espectral dos materiais constituintes da crosta terrestre, ou seja, que estejam relacionados com a variação litológica, como é o caso das imagens geofísicas de gamaespectrometria ou magnetometria.

A interpretação geológica consiste no reconhecimento na imagem dos elementos naturais da paisagem (drenagem e relevo). Esses desempenham papel fundamental no desenho da paisagem natural da superfície terrestre, bem como suas disposições refletem a organização estrutural, a qual, de uma forma geral, exerce controle nas acumulações minerais. A variação tonal é um outro elemento de imagem que merece destaque por ser condicionada à reflectância dos alvos na superfície terrestre. Para os produtos integrados multifontes, considera-se a variação de matiz, a qual reflete as características (variação litológica) dos dados utilizados na fusão com imagens SAR ou com um produto derivado das imagens multiespectrais.

A seguir, realiza-se um exame cuidadoso do padrão de organização desses elementos, pela análise das propriedades de suas formas. A partir desse exame, individualizam-se na imagem vários setores com propriedades de textura e estrutura similares, os quais constituem zonas homólogas. Os limites entre essas zonas podem ser bem definidos e corresponderem a contatos litológicos, o que ocorre quando este contato é marcado por uma quebra negativa de relevo, porém, o mais comum, é a passagem gradual ou difusa das propriedades dos elementos texturais.

A intensidade de retroespalhamento em áreas geológicas é basicamente controlada pelas variações centimétricas de rugosidades superficial do terreno, além das propriedades

dielétricas de cada unidade litológica (Ford *et al.*, 1998). Tais variações topográficas e texturais podem aparecer com maior nitidez em imagens SAR, em comparação com aquelas obtidas em comprimento de ondas menores.

Um importante atributo do radar em sua aplicação em Geologia é a visada lateral, que além de eliminar equívocos causados por pontos situados simetricamente à direita e à esquerda da antena, possibilita a geração de uma carta de sombreamento do relevo (**Figura 2**), dando um aspecto tridimensional, auxiliando na melhor percepção de relevo. As principais vantagens da tecnologia InSAR em investigações geológicas no Brasil são entre outras coisas:

- 1) aquisição de dados independentemente das condições atmosféricas (possibilidade de imageamento em locais recobertos por nuvens e independente da luminosidade solar);
- 2) mapeamentos da copa das árvores e do solo sob a vegetação;
- 3) processamento de dados em computadores pessoais de baixo custo;
- 4) geração de imagens orto-retificadas, modelos digitais de elevação (superfície ou terreno) e produtos derivados.
- 5) geometria de iluminação controlada;
- 6) maior sensibilidade do radar às variações da morfologia da superfície, em comparação com o espectro óptico;
- 7) possibilidade de variações na polarização;

Pequenas variações de declividade do terreno modulam o retroespalhamento de radar sob baixa incidência e realçam a topografia de um modo similar ao sombreamento, a qual salienta o relevo somente sob incidências elevadas (Ford *et al.*, 1998). Os dosséis da cobertura vegetal são os principais espalhadores volumétricos que modulam a rugosidade superficial expressa por diferentes texturas nas imagens. Assim, uma grande variabilidade em incidência torna-se necessária para a efetividade nas aplicações geológicas (Singhroy, 1992).

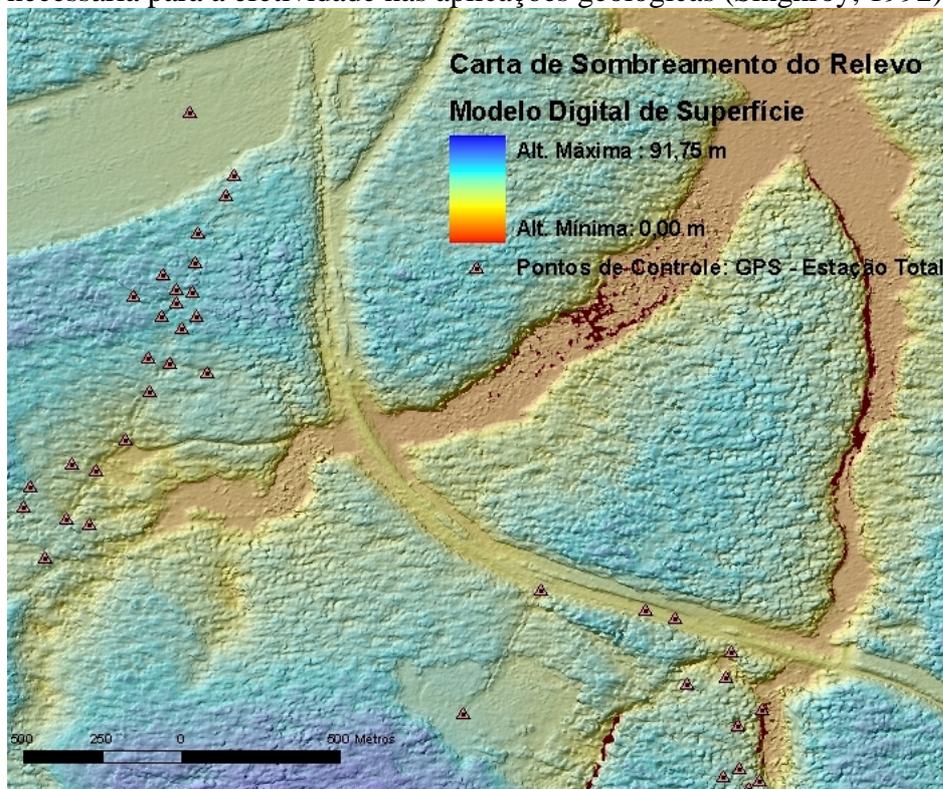


Figura 2: Carta de Sombreamento do Relevo.

Conhecendo-se a topografia do terreno e a posição do sol, é possível criar uma imagem que representa a quantidade de luz refletida para uma posição diretamente acima da cena.

Desta forma, de posse de um MDT, é possível gerar uma imagem multiespectral conjugada com a topografia.

Na Carta de sombreamento acima podemos observar áreas que tendem ao azul, áreas significativamente altas, mas com relevo plano formando grandes *planaltos* ou *platôs*, que é a classificação dada a uma forma de relevo constituída por uma superfície elevada, com cume de certo modo nivelado, geralmente devido à erosão eólica ou pelas águas. Onde observa-se topos retos, superfícies topográficas, que podem ser regulares. E nas áreas com cores que tendem ao laranja, encontra-se as áreas de planície e áreas de drenagens, que correspondem as áreas mais baixas.

Segundo estudos, as reservas de bauxita estão localizadas geralmente em áreas equatoriais, onde o alumínio precipitado no solo tende a se concentrar devido a grande presença de água, localizados em terrenos planos e formando os chamados aluminicretes, de onde a bauxita é extraída. A Região Amazônica é uma grande reserva deste minério.

5. Geocodificação e Calibração da Imagem SAR

O processo de geocodificação de imagens SAR para finalidades cartográficas consiste na geração da ortoimagem SAR sobre uma grade (matriz), representada por um mapa de projeção sem as distorções geométricas inerentes de sistemas de radar de visada lateral, como, por exemplo, encurtamento de rampa, inversão e sombra, que são erros induzidos pela topografia do terreno.

Segundo Rosa (2004), devido ao relevo, a forma da Terra não pode ser descrita precisamente por meio de equações de elipsóide ou geóide, sendo necessárias informações da topografia do terreno para que as distorções geométricas possam ser corrigidas no processo de geração das ortoimagens SAR.

No caso de radares aerotransportados, normalmente, a geocodificação das imagens utiliza-se de dados da plataforma inercial (INS) e pontos de controle do GPS, garantindo uma melhor acurácia nos resultados.

Para que o modelo de elevação seja preciso, a fase interferométrica precisa ser calibrada, ou seja, necessita-se determinar o “offset” de fase. Com o conhecimento do “offset” de fase, determina-se a fase interferométrica absoluta. Para que isso seja possível, utilizam-se pontos de controle GPS no terreno, como representados na **Figura 3**, onde à esquerda tem-se um “corner-reflector” e à direita o sinal brilhante deste refletor na imagem SAR. O ponto brilhante possui coordenadas e altitude conhecidas e, por um processo de geocodificação inversa, determina-se o “offset” de fase.

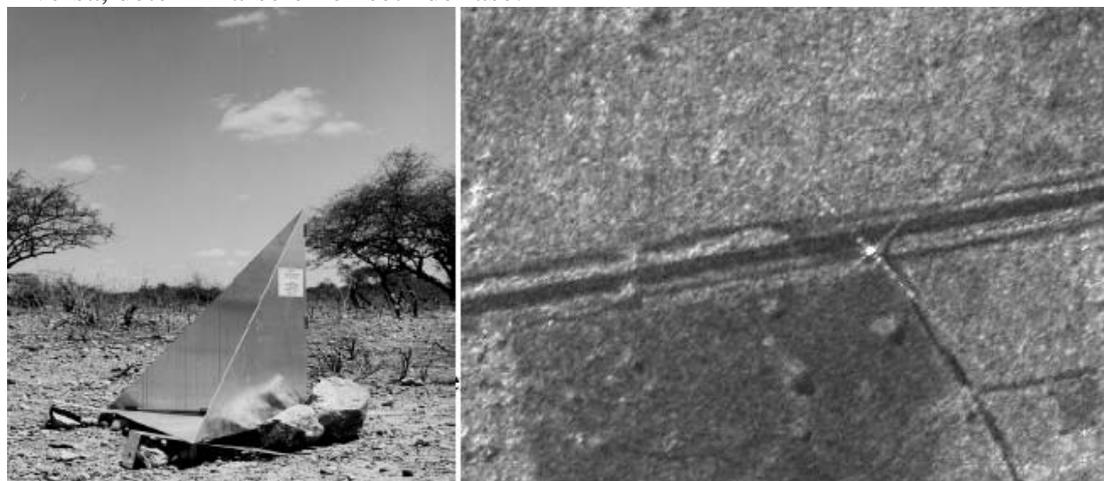


Figura 3: Imagem de um “corner-reflector” e do sinal correspondente na imagem SAR.
Fonte: Rosa (2004)

A disposição dos refletores utilizados na geocodificação das imagens do Projeto MRN é apresentada na **Figura 4**, neste caso, foram 14 refletores observados pelo radar e rastreados com receptores GPS de dupla frequência L1/L2. Os valores das altitudes do MDS e dos refletores rastreados, bem como a diferença Z entre eles, são apresentados na **Tabela 1**. A diferença média foi de aproximadamente 0,5 metros.

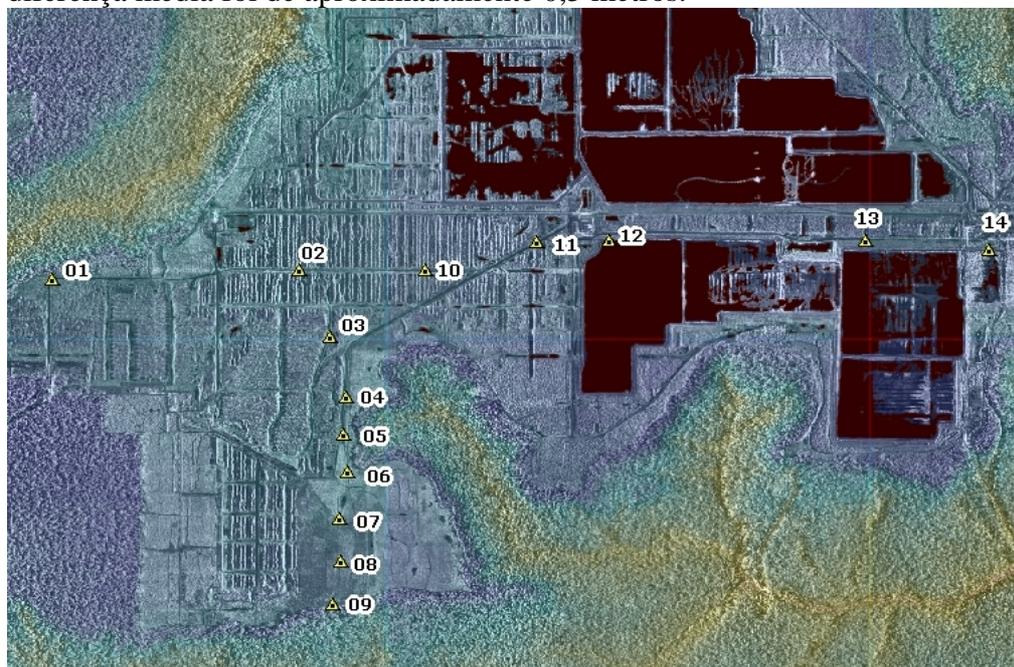


Figura 4: Localização dos refletores no terreno: Projeto MRN.

Ponto	Altitude do MDS (m)	Altitude do ponto (m)	Diferença Δh (m)
01	148,989	148,647	0,342
02	149,556	148,927	0,629
03	150,616	149,738	0,878
04	144,85	144,37	0,48
05	144,468	144,346	0,122
06	142,513	142,842	0,329
07	151,453	151,218	0,235
08	159,067	159,790	0,723
09	157,293	157,068	0,225
10	148,044	147,303	0,741
11	152,248	151,441	0,807
12	166,026	165,015	1,011
13	153,083	154,032	0,949
14	166,985	166,897	0,088
Média	-	-	0,540

Tabela 1: Comparação entre as altitudes obtidas: MDS x Topografia.

4. Validação do Modelo Digital de Superfície e da Imagem da Banda X

Para validarmos o MDS do Projeto MRN foi feito em campo um levantamento topográfico com estação total, apoiado por receptores GPS de dupla frequência. Foram levantadas duas poligonais topográficas partindo de um marco geodésico localizado no aeroporto de Trombetas. Numa delas seguiu-se pela estrada e na outra por uma trilha no meio da mata. A distribuição e localização desses pontos podem ser visto na **Figura 5**. Os pontos em vermelho estão em áreas abertas e os em amarelo estão localizados sob as árvores. Na **Tabela 2** podemos ver as diferenças altimétricas entre as altitudes do MDS comparados com os pontos da poligonal no terreno. No caso dos pontos situados sob cobertura vegetal as diferenças são as alturas das copas das árvores que refletiu o sinal do radar. No caso do sinal da banda P, há

penetração até a superfície do terreno. A diferença altimétrica entre os MDSs (banda X) e os MDTs (banda P), para uma mesma região, pode servir para o cálculo de biomassa dessa área.



Figura 5: Localização dos pontos de controle GPS no terreno: Projeto MRN.

Ponto	Altitude do MDS (m)	Altitude do ponto (m)	Diferença Δh (m)
1	42,333	42,121	0,212
2	49,820	48,973	0,847
3	32,702	32,014	0,688
4	32,090	31,421	0,669
5	31,292	30,640	0,652
6	52,236	41,032	11,204
7	57,091	41,041	16,050
8	61,696	41,613	20,083
9	57,806	41,988	15,818
10	61,196	43,209	17,987
11	62,309	43,470	18,839
12	62,300	42,606	19,694
13	63,452	42,648	20,804
14	58,562	42,874	15,688
15	62,228	43,834	18,394
16	68,182	42,850	25,332
17	61,032	43,150	17,882
18	56,951	43,933	13,018
19	51,888	43,380	8,508
20	47,096	41,372	5,724
21	50,780	35,682	15,098
22	33,910	25,369	8,541
23	42,922	31,464	11,458
24	31,377	26,365	5,012
25	55,025	33,286	21,739
26	59,245	34,359	24,886
27	50,323	29,121	21,202
28	42,330	26,781	15,549
29	41,543	26,350	15,193
30	48,068	26,658	21,410
31	49,206	27,841	21,365
32	48,635	20,807	27,828
33	45,085	22,219	22,866
34	27,599	23,563	4,036
35	40,454	21,238	19,216
36	41,759	20,267	21,492
37	30,407	17,813	12,594
38	34,452	22,896	11,556

Tabela 1: Comparação entre as altitudes obtidas: MDS x Topografia.

4. Considerações finais

Considerando-se os resultados preliminares obtidos no Projeto Mineração Rio do Norte, sugerimos a utilização desta metodologia de mapeamento, tanto no campo da geologia como em outras aplicações, em regiões da floresta amazônica e em áreas similares, atendendo as expectativas e necessidades de seus usuários. Esta metodologia pode também contribuir com informações multidisciplinares: técnicas e científicas, sobre o meio ambiente destas regiões. A validação preliminar dos produtos gerados pelo radar aerotransportado Orbisar-1, apresentada neste trabalho, por meio de seus resultados comparativos, aponta como viável e promissor a utilização desta tecnologia por se mostrar uma poderosa ferramenta de captura de dados geográficos, em condições atmosféricas adversas e com ausência de luz natural. Principalmente em aplicações de engenharia básica (Hemerly, 2006) e em áreas cobertas por densa vegetação, onde se espera uma precisão plani-altimétrica dos modelos de elevação compatível com as necessidades de cada projeto.

Referências

Almeida Filho, R.; Shimabukuro, Y. E. Detecting areas disturbed by gold mining activities through JERS-1 SAR images, Roraima State, Brazilian Amazon. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 17, p. 3357-3362, 2000.

Moreira, J. "Operational Processing of Airborne P-band InSAR Data for Ground Topography Estimation", in **Proceedings of IGARSS'99**, (Germany), pp.1724 - 1726, 1999.

Hemerly, V. E. **Validación de Imágenes SAR Bandas X / P y de MDT's en Aplicaciones de Ingeniería Básica**. Revista Infogeo: versão em espanhol. São Paulo, 2006.

Rombach, M. "OrbiSAR-1 System", to be published.

Livro:

Ford, J.P.; Blom, R. G.; Coleman Jr., J.L.; Farr, T.G.; Plaut, J.J; Pohn, H. A.; Sabins Jr., F.F. Radar Geology. In: Henderson, F.M.; Lewis, A.J. (eds), **Principles & Applss of Imaging Radar – Manual of Remote Sensing**. 3ed. New York: Joh Wiley & Sons, 1998, 565p.

Florenzano, T. G. **Imagens de satélites para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 97 p.

Gupta, R. P. **Remote Sensing Geology**. Springer – Verlag. Berlin, 1991, 356p.

Sabins Jr, F. F. **Remote Sensing Principles and Interpretation**. 2ª Edição. W.H. Freeman and Company, New York, Editora Local, 1987. 449p.

Singhroy, V. H. Radar geology: techniques and results. **Episodes**.v.15, n.1, p15-20, 1992.

Tese:

Boggione, G. A. **Restauração de imagens do satélite Landsat-7**. 2003. 160 p. (INPE-10462-TDI/929). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2003.

Rosa, R. A. S. **Desenvolvimento de um Algoritmo de Desdobramento de Fase para Radar de Imagens Interferométrico Aerotransportado Utilizando uma Linha de Base**. 2004. 106f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

Eventos:

Cunha, F.M.B. Controle tectônico-estrutural na hidrografia da região do Alto Amazona. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 40, 1988. Belém. **Anais...** Belém: SBG, 1988, v.5, p. 2267-2277

Lima, M.I.C. de. Lineamentos estruturais na seqüência Cenozóica e suas relações com o craton Amazônico e bacia do Alto Amazonas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 40, 1988, Belém. **Anais...** Belém: SBG, 1988. v.6, p. 2396-2406.

Lima, M.I.C.; Monteiro, N.; Silva, L.Z.; Marinho, D.A. Identificação de morfoestruturas anômalas na porção centro-oriental da bacia do Maranhão (Brasil), através de imagens SLAR e Landsat-TM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 6, 1990, Manaus. **Anais...** Manaus, 1990. v.3, p.663-670.

Novo, E. M. L. M.; Barbosa, C. C. F.; Freitas, R. M.; Melack, J.; Shimabukuro, Y. E.; Pereira Filho, W. Distribuição sazonal de fitoplâncton no Lago Grande de Curuai em resposta ao pulso de inundação do Rio Amazonas a partir da análise de imagens MODIS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 3175-3182. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/rep-/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.19.19.44>>. Acesso em: 07 ago. 2006.

Oliveira Júnior, H. J.; Shimabukuro, Y. E. Mapeamento da cobertura da terra dos Estados do Goiás e Tocantins utilizando imagens do sensor MODIS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 1641-1648. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/rep-/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.21.17.27>>. Acesso em: 07 ago. 2006.

Nota de agradecimento:

Os autores agradecem a Cia. Mineração Rio do Norte pelo suporte material, permitindo a divulgação dos dados apresentados neste trabalho.