

# O USO DE RADAR ORBITAL EM APLICAÇÕES AMBIENTAIS NA AMAZONIA BRASILEIRA : A AVALIAÇÃO DO RADARSAT NO PROGRAMA ADRO

Waldir R. Paradella\*  
Frank Ahern \*\*  
Hermann J. H. Kux \*  
Evelyn M. L. de M. Novo\*  
Maycira P. de F. Costa\*  
Yosio E. Shimabukuro\*  
Diógenes S. Alves\*  
Dalton de M. Valeriano\*

\*INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)  
São José dos Campos, São Paulo, CEP 12227-010 - Brasil

\*\* CCRS (Canada Centre for Remote Sensing)  
Ottawa, Ontario, K1A 0Y7 - Canada

**Abstract.** This paper describes the main objectives, rationale and characteristics of the evaluation project, as proposed by INPE, for the Brazilian Amazon Region in the RADARSAT ADRO (RADARSAT Application Development and Research Opportunity) Program. The research encompasses a variety of applications as follows: (1) Geological Mapping and Mineral Exploration; (2) Land Use Mapping and Monitoring; (3) Flood Monitoring and Floodplain Management; (4) Environmental Impact Study of Reservoirs; (5) Tropical Forestry Inventory; (6) Dynamic of Land Use and (7) Forest Phenological Change Detections. Several Brazilian agencies and CCRS are involved in this investigation.

**Keywords:** RADARSAT evaluation, Amazon Region, ADRO Program, Brazil.

## 1. Introdução

A Região Amazônica corresponde a quase 58 % do território nacional, com uma imensa necessidade de mapeamento e monitoramento de seus recursos naturais renováveis e não renováveis. A integração desta área com o restante do país é cada vez mais estratégica devido ao seu enorme potencial em recursos naturais e a sua baixa densidade demográfica. O sensoriamento remoto orbital tem sido usado desde 1972, com o advento do primeiro satélite MSS-Landsat. Contudo, a utilização do espectro óptico tem apresentado limitações devido às condições adversas de coberturas de nuvens, que restringem a aquisição de dados, e ao elevado ângulo de elevação solar próximo ao equador, que limita o sombreamento e o realce topográfico do relevo. Por outro lado, o imageamento por radar tem-se constituído em alternativa valiosa na aquisição de informações indiretas neste tipo de terreno. Isto pode ser visto nos resultados de aerolevantamentos dos projetos RADAMBRASIL, na década de setenta, e recentemente, do SAREX' 92 (Paradella 1993, Paradella et al. 1993, Novo et al. 1993, Kux et al. 1994, entre outros). Embora os resultados do SAREX tenham se mostrado encorajadores, uma avaliação crítica do RADARSAT é necessária. Isto é particularmente

oportuno, quando se observa nas aplicações ambientais, uma substituição do uso radar em aeronaves por dados de radares orbitais (ERS-1, ERS-2, JERS-1, RADARSAT), com relação custo/benefício muito mais favorável ao usuário.

## 2. O RADARSAT

O RADARSAT visa prover dados de áreas sensíveis do planeta do ponto de vista ambiental (áreas de florestas particularmente nos trópicos, continentes Ártico e Antártida, , desertos em expansão, etc.) e também adequados às aplicações em geral (geologia, uso da terra, sistemas aquáticos, agricultura, etc.). Seu imageamento repetitivo possibilitará a coleta de dados em qualquer época e sob condições ópticas desfavoráveis (brumas, nuvens, fumaças, escuridão). Apesar da banda C-HH não ser necessariamente a escolha ótima, ela é a que atende a maior gama de aplicações (NASA 1978). Dois requisitos são essenciais no programa: (1) prover imagens no formato e qualidade comparáveis aos das missões precedentes (ERS-1, ERS-2, JERS-1) e (2) propiciar observações dentro de um intervalo amplo de ângulos de incidência. Seu lançamento foi realizado com sucesso em 04 de Novembro de 1995 e à época deste texto, a fase inicial

de operação do RADARSAT-1 não apresentava problemas. Sua vida útil é estimada em 5 anos e já existem planos para o RADARSAT II visando a continuidade de coleta de dados na próxima década.

O RADARSAT opera em uma órbita sol-síncrona (quase-polar), que cruza o equador em direção ao sul no nascente (órbita descendente) e em direção ao norte no poente (órbita ascendente). Isto possibilita ao sistema receber iluminação solar quase continuamente, o que significa que não haverá distinções sensíveis entre passagens ascendentes e descendentes do ponto de vista de aplicações. Além disso, reduzirá a demanda por bateria solar e evitará conflitos nas estações de recebimento de dados (outros satélites de observação normalmente cruzam o equador próximo das 10:00 ou das 14:00 horas). O satélite coleta dados via comandos terrestres em até 28 minutos de cada ciclo previsto de 100 minutos (órbita completa) e realiza mais de 14 revoluções em 24 horas. Seu ciclo de repetição de órbita é de 24 dias (343 revoluções neste período) e possui um sub-ciclo de sete dias para passagens entre trajetórias adjacentes no terreno. Para atender tal configuração são necessárias uma altitude de 797,9 km e uma inclinação de 98,59 graus (plano orbital no equador). O RADARSAT foi concebido para um imageamento na direção ao norte do plano orbital (visada do lado direito). Isto tornará possível a cobertura regular do Ártico, porém inviabilizará o imageamento da Antártida. Este inconveniente será resolvido com a mudança do imageamento para a direção sul do plano orbital (visada à esquerda), que será conduzida durante um intervalo de duas semanas (tempo previsto para a cobertura de toda a Antártida), em épocas de máxima e mínima coberturas de gelo. O RADARSAT também possui gravadores de bordo permitindo mais de 10 minutos de aquisição de dados fora do alcance de estações terrestres. No Brasil os dados serão recebidos pela estação do INPE em Cuiabá e processados em Cachoeira Paulista (SP).

No que se refere aos modos de imageamento, seis opções foram previstas: (1) Visadas padrões (Standard Beams), (2) Visadas Amplas (Wide Swath Beams), (3) Visadas com Resolução Fina (Fine Resolution Beams), (4) Scansar, (5) Visadas Estendidas com Alta Incidência (High Incidence Extended Beams) e (6) Visadas Estendidas com Baixa Incidência (Low Incidence Extended Beams). A Figura 1 ilustra os modos de imageamento e a Tabela 1 mostra suas especificações. O intervalo dinâmico global ("global dynamic range") de níveis registrados será maior que 30 dB e a medida do mínimo sinal detectável ("noise equivalente sigma naught") será de - 18,5 dB. Embora o período de repetição de órbita seja de 24 dias no modo padrão, uma completa cobertura da superfície terrestre é possível com

o modo SCANSAR (500 km de largura) dentro do intervalo de apenas 4 dias, mesmo para latitudes equatoriais. A versatilidade do RADARSAT permite visadas desde 10 ° até 60 ° de ângulos de incidência. Isto o diferencia do atual ERS-1, ERS-2 e JERS-1, com ângulos de incidência entre 23 e 33°. Normalmente altos ângulos de incidência são os mais adequados para o realce topográfico. O maior inconveniente de imagens com baixos ângulos reside nas distorções geométricas causadas por "layover" and "foreshortening" em regiões não planas, como observadas nas imagens ERS-1 e Nadir do Experimento SAREX em Carajás (Bignelli 1994). Além disso, esta múltipla capacidade de variação de visada fornece o meio para imageamento em estéreo (normalmente melhores resultados são obtidos com uma diferença mínima de 20 ° de ângulos de incidência nas visadas). Assim, as imagens do RADARSAT oferecerão adicionalmente as vantagens de estereoscopia presentes nas fotos aéreas convencionais e a potencialidade de caracterização do terreno do radar, com dados de alta resolução espacial, radiométrica e temporal e disponíveis digitalmente. Detalhes sobre o RADARSAT podem ser vistos em CJRS (1993).

### 3. O Programa ADRO

O programa ADRO, lançado em fins de 1994, foi concebido pela Agência Espacial Canadense (CSA), NASA e Radarsat International Inc. (RSI), como um anúncio de oportunidades para a avaliação do RADARSAT. Em torno de 500 propostas foram recebidas até Maio de 1995, envolvendo a avaliação do RADARSAT através de experimentos científicos, desenvolvimento de aplicações, desenvolvimento e demonstração de produtos especiais, no contexto de explorar as características inovadoras do SAR canadense em vários campos de aplicações ambientais. A proposta do INPE (**Proposta 364 - "Development of RADARSAT Applications in Brazilian Amazon"**) foi aprovada pela CSA em Dezembro de 1995 e tem como objetivo principal a avaliação do desempenho do RADARSAT, sob modos distintos de aquisição e configuração, em diferentes condições e ambientes fisiográficos da Amazônia brasileira. Os seguintes temas de aplicação foram priorizados no projeto: (1) Geologia, (2) Uso da Terra, (3) Áreas Inundadas (Planície de Inundação), (3) Impacto Ambiental em Reservatórios, (4) Inventário de Floresta Tropical, (5) Desflorestamento e Dinâmica de Uso da Terra e (6) Detecção de Mudanças Fenológicas em Floresta Tropical. A seguir, são apresentadas as características e discutidos os detalhes da proposta, para cada uma destas aplicações na Região Amazônica.

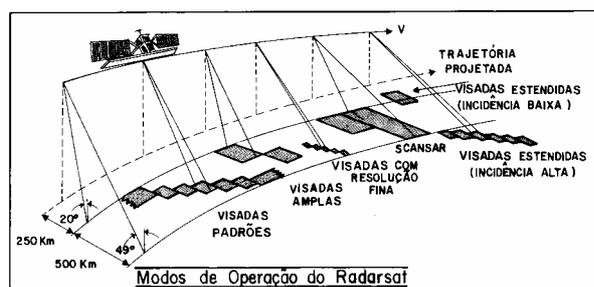


Fig. 1 - Modos previstos de operação do RADARSAT1.

Tabela 1 - Especificações dos modos de visada do RADARSAT1. 1 = nominal, ground range varia com range; 2 = nominal, dependente do processador e do range.

Modo de Visada	Resolução (range <sup>1</sup> x azimute, m)	Looks <sup>2</sup>	Largura (Km)	Incidência (graus)
Padrão	25 x 28	4	100	20 - 49
Larga (1)	48 - 30 x 28	4	165	20 - 31
Larga (1)	32 - 25 x 28	4	150	31 - 39
Resolução Fina	11 - 9 x 9	1	45	37 - 48
Scansar (1)	50 x 50	2 - 4	305	20 - 40
Scansar (2)	100 x 100	4 - 8	510	20 - 49
Estendida (1)	22 - 19 x 28	4	75	50 - 60
Estendida (2)	63 - 28 x 28	4	170	10 - 23

#### 4. Mapeamento Geológico e Pesquisa Mineral na Serra dos Carajás (Pará)

A Província Mineral de Carajás, localizada na borda oriental da Região Amazônica, engloba além dos maiores depósitos de Fe do planeta, os mais importantes depósitos do país de Mn, Cu, Ni, além de mineralizações expressivas em Au e Al. A Província está inserida nos limites de duas zonas de cisalhamento: o "Cinturão Itacaiúnas", de orientação WNW-ESE, idade arqueana e rochas de fácies granulíticas e anfibolíticas e o "Cinturão Araguaia", de orientação NS, provável idade arqueana e rochas de fácies de mais baixo grau metamórfico. Atividades Proterozóicas são representadas por intrusões graníticas anorogênicas e extensas coberturas laterítica-aluminosas de idade Fanerozóicas. Intenso intemperismo químico, presença de latossolos, poucos afloramentos e cobertura de floresta tropical densa, são algumas das características deste "difícil" terreno. Devido a importância econômica, é permanente a necessidade de mapas mais detalhados e que possibilitem a integração regional de áreas mapeadas em detalhe (1:5.000) nos sítios de mineralizações, com áreas de menor conhecimento (1:250.000 a 1:100.000) da maior parte da Província. Embora dados do TM-Landsat tenham sido usados em aplicações geobotânicas (Paradella et al. 1994a), a

presença de nuvens, o baixo ângulo de elevação solar e a cobertura vegetal limitam o uso de dados ópticos em aplicações geológicas na Província. Em contrapartida, dados de radar em aeronaves e orbitais isolados (Paradella et al. 1994b, Veneziani et al. 1994, Liu et al. 1994, Santos et al. 1994, Bignelli 1994) ou integrados com dados TM-Landsat e aerogeofísicos (Paradella et al. 1996), tem-se mostrado valiosos no mapeamento geológico e pesquisa mineral. Dentro deste contexto, os principais objetivos da investigação em Carajás são: (1) avaliar o uso do RADARSAT nos modos Narrow Scansar e Padrão (Standard), na análise tectônica/estrutural e no mapeamento geológico; (2) avaliar o desempenho de produtos integrados RADARSAT (Modo Padrão) com imagens digitais TM-Landsat e aerogeofísicas (mag e gama), como modelo para mapeamento geológico sistemático em ambiente de floresta densa tropical; (3) avaliar a potencialidade do uso do RADARSAT (Resolução Fina) na caracterização de atividades de mineração (mina de ferro de N4) e no mapeamento de lateritas relacionadas com mineralizações de ferro (depósitos de N1 e S11). As imagens do modo Scansar serão adquiridas sob intervalo de incidência entre 32 a 46°, órbita descendente, cobrindo uma área de 300 por 300 km (coordenadas do centro da área: S 06° 00' e W 50° 15'). As imagens no Modo Padrão serão adquiridas em orbitas descendente e ascendente, sob ângulos de incidência de 35 e 49° visando a obtenção de produtos com estereoscopia, e cobrem uma área de 100 por 100 km (coordenada central aproximada: S 06° 07' e W 50° 18'). Finalmente, uma cena no Modo de Resolução Fina, cobrirá, em órbita descendente e ângulo de incidência de 49°, uma área de 40 por 40 km, centrada aproximadamente no depósito de N1 (S 06° 03' e W 50° 17'). A pesquisa em Carajás tem a participação da CPRM, da DOCEGEO (Grupo CVRD) e do CCRS.

#### 5. Uso da Terra (Acre)

Resultados prévios do uso de imagens TM-Landsat no Acre, sobre assentamentos agrícolas de pequenas dimensões (50 - 100 ha), mostraram as limitações do uso de imagens no espectro óptico: presença de nuvens e a não disponibilidade de dados para o monitoramento sistemático das mudanças no uso da terra (Luchiarri e Kux 1986). Por outro lado, as conclusões do SAREX'92 para esta região, com simulações do RADARSAT, indicam que imagens SAR orbitais C-HH isoladas e integradas digitalmente com TM-Landsat, permitem o mapeamento confiável do desflorestamento, detecção de áreas de pastagens, culturas anuais em médias escalas (1:250.000), bem como o mapeamento geomorfológico e de feições hidrológicas (Ahern et al.

1993, Kux et al. 1993, 1994, 1995). Dois períodos são críticos para a aquisição de dados na área: antes (Abril/Maio) e após (Outubro) a época de queimadas. Desta forma, os principais objetivos na proposta do ADRO no Acre são: (1) avaliar o conteúdo de informação no Modo Padrão do RADARSAT, com ângulo de incidência de 49°, órbita descendente, datas de aquisição em Abril e Outubro de 1996, na detecção de cobertura vegetal, caracterização do uso da terra, mapeamentos geomorfológico, de solos e hidrológicos; (2) avaliar a precisão dos mapas temáticos obtidos (média escala) e (3) comparar a performance do RADARSAT com dados do JERS-1 (banda L, HH, ângulo de incidência de 33 °) dentro das aplicações discutidas acima. As coordenadas geográficas da área selecionada são: S 10° 15' W 68° 00' (região de Rio Branco/Sena Madureira). Neste área teste, além do INPE participam a FUNTAC (Fundação de Tecnologia do Estado do Acre), a UFAC (Universidade Federal do Acre) e o CCRS.

## **6. Monitoramento de Áreas Inundadas e de Planícies de Inundação (Lago Grande, Monte Alegre, Pará)**

A planície de inundação Amazônica estende-se dos Andes ao Oceano Atlântico, em uma faixa de largura variando de 20 a 100 km, inundada quase completamente na época da cheia. Com precipitações anuais de até 4.000 mm, está é também uma das mais úmidas regiões do mundo, produzindo flutuações de até 10 metros no nível do Rio Amazonas e responsável pela tremenda variação de área inundada da planície no transcorrer do ciclo anual. Esta planície de inundação é um dos mais produtivos ecossistemas do mundo, representando metade das terras férteis da Amazônia, e esta fertilidade resulta da deposição de nutrientes ligados a variação anual da inundação. Os nutrientes dissolvidos aumentam a produtividade primária, e consequentemente, a biomassa vegetal e piscosidade. A fertilidade dos solos da planície de inundação pode ser relacionada a coloração da água. Assim, áreas da planície com rios de águas claras são mais produtivas que as de rios de águas escuras (Junk et al. 1993).

Todo este imenso potencial não tem sido explorado para fins de agricultura, criação de gado, pesca e uso de plantas aquáticas devido a ausência de informação da extensão da área inundada. De modo geral, o uso agrícola é limitado pela inundação e pode ser aumentado pelo desenvolvimento de variedades de maturação precoce. Existe também uma abundância natural na produção pesqueira relacionada aos ciclos de cheia e a fertilidade de lagos da planície, que pode ser explorada economicamente com o desenvolvimento de práticas de aquicultura. Em relação a pecuária é

importante mencionar o papel da vegetação aquática como fonte de alimento (as macrófitas são importantes não apenas como fonte de alimento para os animais mas também, como controles na poluição das águas e fonte de fertilidade (matéria orgânica) dos solos. A planície de inundação não é só importante em escala regional, mas representa um papel importante nos processos diretos e indiretos de mudanças globais. Fica evidente que em futuro próximo o aproveitamento dos recursos naturais deste ecossistema será inevitável. O monitoramento da dinâmica da planície de inundação não é tarefa fácil devido a enorme dimensão da área afetada. É neste aspecto que reside a importância do uso do sensoriamento remoto orbital, particularmente no espectro das microondas, como os dados do futuro RADARSAT. Dados de radar têm demonstrado uma boa capacidade para a discriminação de plantas aquáticas e limite terra/água (Novo et al. 1995a, Costa et al. 1996).

O Lago Grande de Monte Alegre (20° 15' S e 54° 15' W), no Estado do Pará, foi selecionado como área teste para a avaliação do RADARSAT em monitoramento de inundação e manejo da planície de inundação. Esta área foi selecionada em virtude de ser possível, através de dados do SAREX'92 e JERS-1, a detecção durante a vazante de feições geomórficas ligadas à dinâmica fluvial (deltas interiores, barras de areias, etc.) dos canais de drenagens dos Rios Paituna e Maicuru, que desembocam no Lago Grande. Espera-se que com imagens do RADARSAT sob 40° de ângulo de incidência, seja possível mapear com detalhes estas feições internas, bem como o mapear e monitorar o contato da "Várzea" com "Terra Firme" e a extensão em área de macrófitas e vegetação de áreas emersas. Assim o objetivo geral do experimento em Lago Grande será o de avaliar e desenvolver o uso dos dados do RADARSAT no monitoramento do ciclo anual de inundação do Rio Amazonas, como subsídio para o modelo de manejo adequado da planície de inundação da Amazônia Brasileira. Os objetivos específicos são: (1) avaliar a detecção e mapeamento de mudanças do contato "água-terra"; (2) avaliar a possibilidade de estabelecer a transição entre a planície de inundação e área permanentemente não inundável; (3) detecção e monitoramento dos tipos e mudanças na vegetação aquática e terrestre; (4) comparar as performances do RADARSAT, JERS-1 e ERS-1 no monitoramento e manejo da planície de inundação. Para que esta investigação seja conduzida, os dados serão adquiridos no modo Padrão, em quatro diferentes épocas: início da cheia (Abril 96), máxima cheia (Junho 96), início da vazante (Setembro 96) e máxima vazante (Novembro 96). Para a aquisição de Abril, os ângulos de incidência serão de 24 e 49°, sendo usado o ângulo de 49° para o

restante das aquisições. JERS-1, ERS-1 e TM-Landsat serão tentativamente adquiridos junto com os dados RADARSAT (órbita descendente). São participantes da pesquisa o CENA/USP e o CCRS.

### **7. Impacto Ambiental em Reservatórios (Tucuruí, Pará)**

A Bacia Amazônica, incluindo as Bacias do Tocantins e Araguaia, cobre uma área de mais de 7.000.000 Km<sup>2</sup> e tem um potencial hidrelétrico estimado em 100.000 MW (metade do potencial de todo o país). De modo a utilizar este potencial, 63 hidrelétricas devem ser construídas na Região, estando já em operação Tucuruí, Balbina e Samuel. Portanto, há uma tremenda necessidade de informação para a caracterização do impacto ambiental destes projetos, que potencialmente inundarão uma área estimada de 100.000 km<sup>2</sup> (Junk e Mello 1990). Entre os possíveis impactos merecem menção: (1) perda de solos agrícolas; (2) perda de recursos florestais (a madeira comercial submersa é estimada em 40 a 60 m<sup>3</sup> por ha); (3) mudanças na geomorfologia dos rios (mudanças nas taxas de erosão e de sedimentação em silte); (4) mudanças na fauna e flora; (5) mudanças no potencial pesqueiro; (6) crescimento indesejável de plantas aquáticas. Deve-se ainda ser considerado o papel representado pelos reservatórios como fonte de metano em mudanças regionais e globais.

De acordo com estudos de Junk e Mello (op. cit.), o aumento na quantidade de vegetação aquática é um dos maiores impactos ambientais dos grandes reservatórios tropicais. A proliferação deste tipo de vegetação está ligada a um aumento de doenças tropicais (Schistosomiasis), deterioração da qualidade da água vinculada à decomposição de matéria orgânica, degradação de condições de pesca, navegação e turismo. Desde 1985 quando da formação do lago artificial de Tucuruí, a infestação por macrófita tem sido detectada. Em 1986, estudos da ENGEVIX para a Eletronorte, com imagens do TM-Landsat estimavam que 25% da área do reservatório mostrava indícios de infestação de espécies desta vegetação aquática. Este estudo preliminar também indicava a limitação do uso de sensores ópticos no monitoramento destes efeitos, com dados sendo restritos somente à estação seca (Junho a Setembro). Estudos posteriores complementaram as conclusões iniciais e enfatizaram a necessidade de dados sazonais sistemáticos no monitoramento dos efeitos ambientais de Tucuruí (Pereira Filho 1990, Abdon e Meyer 1990, Pires e Novo 1991, Novo e Tundisi 1994).

Neste sentido, resultados recentes tem mostrado que a biomassa de macrófitas muda sazonalmente e

anualmente de acordo com a disponibilidade de nutrientes. Observações de campo (Novo et al. 1995b) mostraram que a comunidade de macrófitas em Tucuruí está submetida a sucessão e que em áreas de intenso deflorestamento, as espécies flutuantes como *Scirpus cubenses* estão sendo substituídas por macrófitas enraizadas como a *Typha Dominguenses*

Estas mudanças em tempo e espaço e seus relacionamentos com o uso da terra, geomorfologia e outras variáveis ambientais possuem elevada importância ecológica e podem ser usadas como índice de siltação do reservatório. A presença da *Typha Dominguenses* é geralmente indicador da fase terminal do sistema aquático. O estudo destes aspectos em reservatórios na Região Amazônica é muito difícil devido a dimensão e a inacessibilidade da área, a presença de condições atmosféricas adversas, que inviabilizam um monitoramento sistemático através de aerolevantamentos no espectro óptico. Dados de radar do SAREX'92, em vários modos e resolução, foram também adquiridos em Tucuruí e avaliados juntamente com dados SAR do ERS-1 e do TM-Landsat. A investigação tem mostrado que as macrófitas podem ser discriminadas em classes e distintas densidades de biomassa (Novo et al. 1995a, Novo et al. 1995b, Noernberg 1995, 1996). A integração digital de dados de radar com distintas polarizações e ângulos de incidência, bem como a fusão com dados do TM-Landsat, tem demonstrado o enorme potencial do uso destas imagens no estudos de sistemas aquáticos (Costa 1995). Estes estudos também tem mostrado ser possível através do ERS-1 a discriminação entre vegetação aquática densa, vegetação de floresta e água aberta, mas não a separação de vegetação aquática de baixa densidade de água aberta.

Com base nestes resultados prévios, o projeto de pesquisa proposto no ADRO para Tucuruí visa o desenvolvimento de aplicações com dados do RADARSAT no monitoramento de vegetação aquática do reservatório e estudar o efeito da polarização na identificação de ambientes aquáticos através de comparação com dados do ERS-1, sob condições similares de geometria de imageamento. Os dados RADARSAT serão adquiridos em órbitas descendentes, em 3 diferentes datas correspondentes ao início do enchimento (Abril 96), máximo nível (Junho 96) e mínimo nível (Novembro 96). Os ângulos de incidência serão de 24° para comparação com o ERS-1 e 49° para maximizar a discriminação entre vegetação aquática. Imagens do TM-Landsat serão tentativamente adquiridas em Junho 96. A área a ser investigada está centrada no Reservatório de Tucuruí (40° 15' S e 49° 40' W) e a pesquisa contará com a participação da Eletronorte.

## **8. Inventário de Floresta Úmida Tropical e Aplicação Geológica no Parque Nacional de Tapajós (Pará)**

A Floresta ou Parque Nacional de Tapajós, com aproximadamente 600.000 ha., é caracterizada por diversos ecossistemas e tem sido estudada por vários autores (Cailliez 1977, Hernandez Filho et al. 1993, 1994). A Floresta Tropical Densa cobre duas unidades geomorfológicas bem definidas: os platôs do Baixo Amazonas e os platôs do Alto Xingú-Tapajós. Efeitos de atividades antropogênicas com desflorestamento e sítios de regeneração são observados nos limites do Parque. Um experimento de amostragem multinível para inventário florestal foi conduzido em 1991 pelo INPE nesta área, integrando informações de imagens de satélite, fotografias aéreas e dados de campo. Este experimento constituiu a base para estratificação da cobertura vegetal presente, para a determinação de cada tipo de floresta e também fornecer uma estimativa da média e do volume total de madeira no Parque de Tapajós (Hernandez Filho et al. 1993). Dados nas microondas foram adquiridos recentemente através do SAREX'92 e estão sendo analisados. Resultados iniciais indicam ser possível discriminar feições geomórficas e ecossistemas nos Platôs do Baixo Amazonas e do Alto Xingu-Tapajós.

Assim, o objetivo maior do projeto nesta área teste é o de avaliar o RADARSAT e desenvolver aplicações para avaliação de cobertura florestal. Diferentes modos de aquisição (Padrão e Alta Resolução) serão avaliados no contexto de classificação florestal, desflorestamento e sítios de regeneração através de comparação com outros dados (SAREX, ERS-1, TM-Landsat). Também o sinergismo digital RADARSAT/TM-Landsat será investigado. Um componente importante na investigação será avaliar técnicas de segmentação com imagens de radar, as quais levam em conta atributos texturais (Yanasse et al. 1993, Yanasse et al. 1995). Um complemento da pesquisa em Tapajós será o de avaliar a aplicabilidade dos dados orbitais do RADARSAT na caracterização geomorfológica, discriminação litológica e estrutural dos sedimentos do Terciário, Mesozóico e Paleozóico. Dados geofísicos serão digitalmente integrados com dados SAREX e RADARSAT, no contexto de estudos tectônicos e estruturais nesta área. Para que estes objetivos sejam alcançados, os dados do RADARSAT serão adquiridos em órbita descendente, em duas diferentes datas, correspondentes ao período úmido (Abril 96) e seco (Setembro 96). As aquisições serão realizadas sob condições de 40° de ângulo de incidência e as coordenadas geográficas são respectivamente: 3° 30' S e 54° 52' W (centro no Modo Padrão) e 3° 6' S e 55° W (centro no Modo de Alta

Resolução). Participam também da investigação o IBAMA e o CENPES/PETROBRAS.

## **9. Estudos da Dinâmica de Uso da Terra (Rondônia)**

Progressos significativos tem sido obtidos no mapeamento do desflorestamento da Amazônia brasileira através do uso de dados orbitais MSS e TM-Landsat (Tardin et al. 1980, INPE 1992, Alves et al. 1992). Contudo, a formação de floresta secundária é ainda precariamente estudada. Um número de autores tem usado imagens multitemporais Landsat na identificação de floresta secundária e estratificação por idade (Lucas et al. 1992, Skole et al. 1994, Alves e Skole 1995). Imagens de radar podem oferecer a possibilidade de identificar áreas de vegetação secundária e possivelmente, inferir estágios de regeneração através da resposta retroespalhada nas microondas.

O Estado de Rondônia tem exibido um aumento no total de área deflorestada de 4. 200 km<sup>2</sup> em Janeiro de 1978 a 34. 600 km<sup>2</sup> em Agosto de 1991 (INPE 1992). Este processo ocorreu ao mesmo tempo que os arquivos de imagens Landsat do INPE foram formados, tornando assim possível, o uso deste acervo de dados na avaliação destas mudanças e na inferência das idades de áreas de desflorestamento da floresta primária e da vegetação secundária. Rondônia pode ser considerado um laboratório singular para uma avaliação científica consistente do monitoramento do uso da terra através de sensores remotos orbitais. Um número de iniciativas paralelas estão sendo conduzidas no INPE neste sentido (Soares et al. 1995), incluindo uma investigação da dinâmica do uso, que também fornecerá uma variedade de dados adicionais.

O principal objetivo do projeto em Rondônia é o estudo da aplicabilidade do uso do RADARSAT na discriminação entre (1) áreas de floresta primária, (2) áreas desflorestadas ou em uso atual na agricultura e (3) áreas de florestas secundárias. Duas áreas serão imageadas, ambas em órbita descendente e com 49° de ângulo de incidência, uma no modo Padrão (10° S 62° W) e outra no modo de Alta Resolução (10° 45' S e 62° 30' W). O imageamento no modo Padrão será realizado em duas épocas, uma na estação seca (Maio 96) e outra na chuvosa (Setembro de 96). A imagem RADARSAT de alta resolução será prevista para aquisição em Julho de 96.

## **10. Detecção de Mudanças de Fenologia em Floresta Tropical (Amazonas)**

O sensoriamento remoto nas microondas possui um grande potencial para classificar e permitir inferências sobre a estrutura da cobertura vegetal e seu "status" em

termos hídricos (Holmes 1992). A configuração do RADARSAT como um sensor na banda C, polarização HH e capacidade de imageamento sob múltiplos ângulos de incidência, torna-o uma fonte potencial de informação sobre a estrutura e o estado hídrico do dossel vegetal, os quais tem extensiva aplicação no modelamento e avaliação de processos da superfície do planeta, como o ciclo hidrológico e produtividade primária (Roughgarden et al. 1991). Evidências da sensibilidade da banda C aos parâmetros do dossel podem ser vistas em modelos de retroespalhamento de florestas, em experimentos com escaterômetros e em medidas com radar. Sun et al. (1991) discutem os resultados de um modelo que decompõe o retroespalhamento total de uma árvore, em uma soma linear do espalhamento volumétrico de copas, do retroespalhamento direto da superfície dos solos e da interação entre árvores e a superfície do terreno. Seus resultados mostram que na banda C, o retroespalhamento total é fortemente dominante pelo espalhamento volumétrico da copa da árvore. Em uma simulação com o ERS-1 para coníferas, Dobson et al. (1992) concluíram também que o espalhamento volumétrico das copas das árvores domina a resposta de radar na banda C e na polarização VV.

Experimentos com escaterômetros tem demonstrado a sensibilidade da banda C à estrutura do dossel superior. Westman e Paris (1987) e Moore et al. (1991) mediram a seção transversal do radar de árvores artificiais com escaterômetros na banda C. Estes resultados mostraram que o retroespalhamento é uma função da quantidade de folhas e ramos presentes no dossel; como também de sua arquitetura, i. é., seus arranjos espaciais. Foi também detectada a dependência do sinal em relação aos parâmetros do sensor como a polarização e o ângulo de incidência. Escaterômetros na banda C tem também sido usados em estudos de vegetação, quer medindo-se ramos individuais (Zoughi et al. 1989), árvores individuais (Hirosawa et al. 1989 entre outros) ou dosses de florestas (Westman e Paris 1986, entre outros). A sensibilidade à estrutura do dossel e aos parâmetros do sensor tem sido reportadas em todos estes experimentos. Os comportamentos do dossel e dos parâmetros do sensor variam nestes experimentos devido a utilização de diferentes tipos de árvores.

Trabalhos que enfocam a influência do dossel na resposta de radar na banda C são ainda escassos na literatura. Dobson et al. (1992) detectaram variações de respostas ligadas à estrutura da copa de coníferas. Ahern et al. (1993) concluíram que a perda de folhas causa um aumento no retroespalhamento, indicando que para este tipo de floresta, a biomassa foliar age mais como um atenuador do que uma fonte de espalhamento.

Pope et al. (1994) encontraram pouco uso desta banda para a discriminação de tipos de florestas em uma região de ambiente tropical.

O exame da aplicação do RADARSAT para a detecção de mudanças sazonais em Florestas Tropicais Umidas deve ser cuidadosamente conduzido, explorando principalmente suas características de variação de ângulo de incidência e aquisição multitemporal. A investigação proposta no ADRO será conduzida próxima a Manaus e objetiva o desenvolvimento de um algoritmo capaz de fornecer um mapa das mudanças fenológicas no dossel da floresta através de dados multitemporais do RADARSAT. A aplicabilidade deste algoritmo será testada em escala regional, em uma área representativa da Amazônia. O suporte técnico e científico em Floresta Tropical será buscado no INPA, o qual juntamente com o Smithsonian Institute, desenvolve uma investigação ecológica ("Biological Dynamics of Forest Fragments Project") na mesma área teste (coordenadas 2° 40' S e 59° 50' W). O modo de aquisição será o Visada Ampla (Wide Swath Beam) com ângulos de incidência de 30 e 22 ° em órbita descendente. Duas datas foram propostas para aquisição: Agosto de 96 e Fevereiro de 97.

## 11. Conclusões

Um projeto de pesquisa foi concebido, submetido e aprovado dentro do Programa ADRO para avaliação dos primeiros dados coletados pelo RADARSAT na Amazônia. O projeto tem como características principais: uma forte conotação aplicada, envolve temas distintos e cobre ambientes diversificados fisiograficamente na Região Amazônica. A participação de agências nacionais, particularmente as de vocação regional na Amazônia brasileira, foi prioritária na concepção do projeto e será fundamental na avaliação realística do RADARSAT, na transferência de tecnologia gerada e principalmente, na formação de recursos humanos qualificados, que possam transformar os dados coletados, em informações valiosas no levantamento e monitoramento dos recursos naturais da região.

**Agradecimentos:** Os autores agradecem ao suporte dado por Fernanda A. Leite (DSR/OBT) na edição do texto.

## Bibliografia

Abdon, M. M. ; Meyer, M. 1990 "Variação temporal de áreas ocupadas por macrófitas aquáticas no Reservatório de Tucuruí através de dados do Satélite Landsat/TM". In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento

Remoto, 4, 24-29 Julho, , Manaus, **Anais**, INPE, pp: 545 - 548.

Ahern, F. J.; Kux, H. J. H.; Salcedo, R.; Pietsch, R. W. 1993 "An evaluation of C-Band radar to detect openings in moist tropical forests". In: SAREX - 92 Final Results Symposium, **Proceedings**, Paris, França, 6 - 8 Dezembro, , ESA, pp: 57 - 70.

Ahern, F. J.; Leckie, D. J.; Drieman, J. A. 1993 "Seasonal changes in relative C-band backscatter of Northern Forest cover types". **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, **31** (3): 668-680.

Alves, D. S.; Meira Filho, L. G.; D'Alge, J. C. L.; Mello, E. K.; Moreira, J. c.; Medeiros, J. S. 1992. "The Amazonia Information System". **ISPRS Archives**, V. 28, Commission VI. XVII ISPRS Congress, Washington, August 1992, pp: 259 - 266.

Alves, D. S.; Skole, D. 1995. "Characterizing Land Use Dynamics Using Multi-temporal Imagery". **International Journal of Remote Sensing** (submetido).

Bignelli, P. A. 1994. "**Avaliação dos dados de radar (SAR) do Projeto SAREX '92 e ERS-1 em mapeamento geológico na Região de Salobo, Província Mineral de Carajás**". Dissertação de Mestrado em S.R., INPE, 124 p.

Cailliez, F. 1977. "**Inventaire de preinvestissent de la Forêt Nationale du Tapajós: Evaluation provisoire des resultats**". PNUD/FAO/IBDF/BRA-76/027)

Canadian Journal of Remote Sensing 1993. **Special Issue: RADARSAT**. vol. **19** (4), Nov./Dez 1993, p: 277-400.

Costa, M. P. F. 1995. "**The effect of airborne SAR-C multipolarization and multiangle images in backscattering separability of Aquatic Plants in the Brazilian Amazon Basin**". CCRS, Technical Report.

Costa, M. P. F.; Ahern, F. J.; Novo, E. M. L.; Pietsch, R. W.; Noernberg, M. 1996. "Separability of Aquatic Plants in the Brazilian Amazon using multi-polarization C-band SAR data. In: International Symposium on R. S. of Environment, **Proceedings**, 25-27 Maio, Vancouver, Canadá.

Dobson, C. M.; Pierce, L.; Sarabandi, K.; Ulaby, F. T.; Sharik, T. 1992. "Preliminary analysis of ERS-1 SAR for forest ecosystem studies". **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, **30** (2): 203-211.

Hernandez Filho, P.; Shimabukuro, Y. E.; Lee, D. C. L.; Santos Filho, C. P. Almeida, R. R. 1993. "**The forest**

**inventory project at the Tapajós National Forest**". São José dos Campos (INPE-5423-PRP/170).

Hernandez Filho, P.; Dutra, L. V.; Silvana, A. 1994. "**Resultados preliminares da análise visual de dados SAREX e descrição das atividades de campo na Floresta Nacional do Tapajós**". São José dos Campos (INPE-5567-NTC/314).

Hirosawa, H.; Matsuzaka, Y.; Kobayashi, O. 1989. "Measurements of microwave backscatter from a cypress with and without leaves". **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, **27** (6): 698-701.

Holmes, M. G. 1992. "Monitoring vegetation in the future: radar" **Botanical Journal of the Linnean Society**, **108** (2): 93-109.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) 1992. "**Deforestation in Brazilian Amazon**". Preprint do INPE, São José dos Campos, Maio 1992.

Junk, W. J. ; Mello, J. A. S. 1990. "Impactos ecológicos das represas hidrelétricas na Bacia Amazônica brasileira". **Estudos Avançados**, **4** (8): 127-143.

Junk, W. J.; Piedade, M. T. F.; Salati, E. 1993. "Recursos hídricos na Amazônia: perspectivas científicas para os anos noventa". **Bases Científicas para Estratégias de Preservação e Desenvolvimento da Amazônia**, **2**: 199-213.

Kux, H. J. H.; Ahern, R. K.; Raney, R. W.; Pietsch, R. W.; Tittley, B. 1993. "The contribution of SAREX '92 campaign to the evaluation of natural resources in tropical rainforest: first results from test-site Acre, SW Amazonia, Brazil". In: 16th Canadian Symposium on Remote Sensing, **Proceedings**, Sherbrooke, Québec, Canada, pp: 53-58.

Kux, H. J.H.; Ahern, F. J.; Pietsch, R. W.; Keil, M. 1994. "Resource management with radar in tropical environments: a case study in Acre State, Brazil". In: ISPRS Comission VII, Symposium on Resource and Environmental Monitoring, **Proceedings**, 26-30 Sept, Rio de Janeiro, vol. 30, part 7a, pp: 135-140.

Kux, H. J. H.; Ahern, F. J.; Pietsch, R. W. 1995. "Evaluation of radar remote sensing for natural resource management in the Tropical Rainforests of Acre State, SW Amazonia, Brazil". **Canadian Journal of Remote Sensing** (in press).

Liu, C. C.; Paradella, W. R.; Veneziani, P.; Santos, A. R.; Bignelli, P. A.; Dias, R. R. 1994. "SAREX imagery for lineament study in the Salobo area, Carajás Mineral Province (Brazil)". In: ISPRS Comission VII, Symposium on Resource and Environmental

Monitoring, **Proceedings**, 26-30 Sept, Rio de Janeiro, vol. 30, part 7a, pp: 426-433.

Lucas, R. M.; Honzak, M.; Foody, G. M.; Curran, P.J.; Corves, C. 1993. "Characterizing tropical secondary forests using multi-temporal Landsat sensor imagery". **International Journal of Remote Sensing**, **14**: 3061-3067.

Luchiari, A.; Kux, H. J. H. 1986. "Avaliação das imagens do TM-Landsat para orientar a implantação de projetos de colonização no Estado do Acre". In: Simpósio Brasileiro de S.R., IV, Gramado, **Anais**, 10-15 de Agosto, Vol. 1, pp: 246-250.

Moore, R. K.; Osman, M. S.; Zoughi, R.; Bredow, J. 1991. "Measurements of radar backscatter from an artificial tree: an indication of azimuthal variation and polarization sensitivity of trees. **International Journal of Remote Sensing**, **12** (3): 401-417.

NASA 1988. "**SAR/Earth Observing System**" (Instrument Panel Rept.), Vol. Iif., Washington, 233 p.

Noernberg, M. 1995. "Analysis of SAR-C multi-polarization data for detection of aquatic vegetation". **International Journal of Remote Sensing** (submetido).

Noernberg, M. 1996. "**Study of Aquatic Vegetation in Tucuuruí Reservoir (Brazil) using airborne SAR-C Multipolarization Data**". International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, XVIII ISPRS Congress, Viena, Julho (submetido).

Novo, E. M. L. M.; Costa, M. P.; Noernberg, M. 1993. "Airborne SAR data to map Tucuuruí reservoir (Amazon). In: SAREX - 92 Final Results Symposium, **Proceedings**, Paris, França, 6-8 Dezembro, ESA, pp: 71-94.

Novo, E. M. L. M.; Tundisi, J. G. 1994. "Contribution of Remote Sensing Techniques to the Assessment of Methane Emission from Large Tropical Reservoirs". **Remote Sensing Reviews**, **10**: 143-153.

Novo, E. M. L. M. ; Costa, M. P.; Noernberg, M. A.; Ahern, F. J. 1995a. "Application of SAR-C data for detection and mapping of aquatic vegetation in the Tucuuruí reservoir, Brazilian Amazon". **Remote Sensing of Environment** (aceito para publicação).

Novo, E. M. L. M.; Silva, M. L. S. 1995b. "Combined analysis of SAR C data and multirate TM/Landsat in the Assessment of aquatic vegetation in the Tucuuruí reservoir, Pará State, Brazilian Amazonia". **IGARSS '1995**, Firenze (in press).

Paradella, W. R. 1993. Radar em Aplicações Geológicas: Os Experimentos SAREX na Província Mineral dos Carajás (Pará) e AIRSAR no Vale do Rio Curaçá (Bahia)". In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, VII, **Anais**, Curitiba, 10-14 de Maio, Vol. III, p: 282-294.

Paradella, W. R.; Liu, C. C.; Veneziani, P.; Santos, A. R.; Bignelli, P. A.; Dias, R. R.; Singhroy, V. H. 1993. "First Results from a SAR Investigation (SAREX data) in the Carajás Mineral Province (Brazilian Amazon Region)". In: SAREX 92 Final Results Workshop, ESA, **Proceedings**, Paris, 6-8 Dezembro, pp: 101-111.

Paradella, W. R.; Silva, M. F. F.; Rosa, N. A.; Kushigbor, C. A. 1994a. "A Geobotanical Approach to the Tropical Rainforest Environment of the Carajás Mineral Province (Amazon Region, Brazil) based on Digital TM-Landsat and DEM data". **International Journal of Remote Sensing**, **15** (8): 1633-1648.

Paradella, W. R.; Liu, C. C.; Veneziani, P.; Santos, A. R. dos; Bignelli, P. A.; Dias, R. R.; Singhroy, V. H. 1994b "An Overview of SAREX' 92 (South American Radar Experiment) Data Acquisition and Preliminary Results from Carajás Mineral Province (Brazilian Amazon Region)" In: Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, **Proceedings**, San Antonio, Texas, 9-12 Maio, Vol.II,p: 214-225.

Paradella, W. R.; Pietsch, R. W.; Toutin, T.; Bignelli, P. A.; Veneziani, P.; Singhroy, V. H. 1996. "Airborne and Spaceborne SAR Integration with TM-Landsat and Gamma Ray Spectrometry for Geological Mapping in a Tropical Rain Forest Environment". In: Eleventh Thematic Conference and Workshops on Applied Geologic Remote Sensing, **Proceedings**, Las Vegas, 27-29 Fev. , 13p. (in press).

Pereira Filho, W. 1990. "**Métodos de integração de dados de campo e de sensoriamento remoto no estudo da influência de caracterização de bacia de captação sobre a concentração de sedimentos em suspensão em reservatório**". Dissertação de Mestrado em S. R., INPE.

Pires, J. S. R.; Novo, E. M. L. M. 1991. "Use of TM/Landsat data to identify silting areas in the Tucuuruí reservoir". **Ciência e Cultura**, **43** (5): 385-388.

Pope, K. O.; Rey-Benayas, J. M.; Paris, J. F. 1994. "Radar remote sensing of forest and wetland ecosystems in the Central American tropics". **Remote Sensing of Environment**, **48** (2): 205-219.

Roughgarden, J.; Running, S. W.; Matson, P. A. 1991. "What does remote sensing do for ecology?" **Ecology**, **72** (6): 1918-1922.

Santos, A. R.; Paradella, W. R.; Liu, C. C.; Venezini, P.; Bignelli, P. A.; Dias, R. R. 1994. "Utilização dos dados SAREX na área que engloba o depósito Bahia, Região de Carajás, Amazônia". In: Congresso Brasileiro de Geologia, 38, Camboriú, **Anais**, vol. 1, pp: 482-484.

Soares, J. V.; Novo, E. M. L. M.; Alves, D. S.; Batista, G. T.; Valeriano, D. M.; Yanasse, C.; Dutra, L. V. 1995 **"Dinâmica da cobertura da terra na Amazônia e sua relação com o ciclo de carbono"**. Proposta de Projeto Temático submetido à FAPESP. INPE, Fevereiro, pp. 60.

Skole, D. L.; Chomentowski, W. H.; Salas, W. A.; Nobre, A. C. 1994. "Physical and Human Dimensions of Deforestation in Amazonia". **Bioscience**, **44** (5): 314-322.

Sun, G.; Simonett, D. S.; Strahler, A. H. 1991. "A radar backscatter model for discontinuous coniferous forests". **IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing**, **29** (4): 639-650.

Tardin, A. T.; Lee, D. C. L.; Santos, R. J. R.; Assis, O. R.; Barbosa, M. P. S.; Moreira, M. L.; Pereira, M. T. Silva, D.; Santos Filho, C. P. 1980. **"Subprojeto Desmatamento"**. Convênio IBDF/CNPq/INPE, Rel. Técnico INPE-1649-RPE/103.

Veneziani, P.; Paradella, W. R.; Santos, A. R.; Liu, C. C.; Bignelli, P. A.; Dias, R. R. 1994. "Dados de radar do SAREX: uma ferramenta para a obtenção de conhecimentos geológicos na Amazônia". In: Congresso Brasileiro de Geologia, 38, Camboriú, **Anais**, pp: 457-460.

Yanasse, C. C. F.; Frery, A. C.; Sant'Anna, S. J. S.; Hernandez Filho, P.; Dutra, L. V. 1993. "Statistical Analysis of SAREX data over the Tapajós-Brazil". In: SAREX 92 Final Results Workshop , ESA, Paris, **Proceedings**, pp: 25-40.

Yanasse, C. C. F.; Frery, A. C.; Sant'Anna, S. J. S. 1995. "Stochastic distributions and the multiplicative model: relations, properties, estimators and application to SAR image analysis". **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing** (submetido).

Westman, W. E.; Paris, J. F. 1987. "Detecting forest structure and biomass with C band multipolarization radar: physical model and field tests". **Remote Sensing of Environment**, **22**: 249-269.

Zoughi, R.; Bredow, J.; Osman, S.; Moore, R. K. 1989. "Fine resolution of coniferous and deciduous trees at C band". **International Journal of Remote Sensing**, **10** (1):147-169.