

Análise sazonal do retroespalhamento da vegetação da várzea Amazônica com imagens polarimétricas de banda C

Luiz Felipe de Almeida Furtado¹
Thiago Sanna Freire Silva²
Evelyn Márcia Leão de Moraes Novo¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
CEP 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
furtadosere@gmail.com; evlyn@dsr.inpe.br

² Ecosystem Dynamics Observatory, Instituto de Geociências e Ciências Exatas
UNESP – Univ. Estadual Paulista, Campus de Rio Claro
Caixa Postal 178 CEP 13506-900, Rio Claro, SP, Brasil.
tsfsilva@rc.unesp.br

Abstract. We analyzed seasonal changes in backscattering response and phase difference for main vegetation types in the Amazon várzea (Lago Grande de Curuai, PA) using two full-polarimetric Radarsat-2 C band images from drought and flood seasons to respond two questions: 1) Are C-band polarimetric images capable of registering both hydrological and phenological changes in the amazon várzea? 2) Which are the most effective polarimetric attributes to quantify these sazonal changes? All PolSAR C-band derived attributes were capable of registering hydrological changes and phenological changes for herbaceous communities, but further research is needed to evaluate the effects of deciduous and evergreen tree species on várzea forests and shrubs formations radar backscatterings, as any notable changes were perceived for these two classes. Freeman-Durden decomposition and C-matrix components were the most efficient polarimetric attributes, because of the ease of interpretation and effectiveness in registering seasonal changes. Despite the richness of information offered by the Cloude-Pottier decomposition, its components are complex and interpretation can be difficult in some situations. This paper concludes that full-polarimetric C band SAR images can be used to map and characterize unexplored várzea regions and/or associate these changes to both dendrometric and structural attributes, in order to characterize these communities quantitatively.

Palavras-chave: SAR polarimetry, polarimetric decomposition, phenology, hidrology, polarimetria SAR, decomposições polarimétricas, fenologia, hidrologia

Cerca de 12% a 29% da bacia do rio Amazonas é coberta por áreas úmidas chamadas de várzea (Melack e Hess 2010), ecossistemas inundáveis localizados nas planícies de inundação dos rios de água branca (Junk 1997). As várzeas são ambientes muito produtivos, com elevada importância social, econômica e ecológica, atuando como habitats para espécies de fauna e flora e fornecendo diversos serviços e produtos para a população ribeirinha (Junk e Piedade, 1997). Além da sua importância local e regional, as áreas úmidas amazônicas exercem um papel fundamental no balanço global de carbono (Melack et al. 2004, Richey et al. 2002).

As principais fisionomias de vegetação da várzea são as florestas inundáveis, formações arbóreo-arbustivas e comunidades herbáceas, que alternadamente experimentam fases aquáticas e terrestres. Sua ocorrência e distribuição se dá em função do ciclo hidrológico da região, conhecido como pulso de inundação (Junk et al 1989; Wittmann et al. 2004; Wittmann et al. 2010, Junk et al. 2012). As florestas de várzea estabelecem-se em regiões onde os períodos de inundação são mais curtos; à medida em que esse período se prolonga, há a ocorrência de formações arbóreo-arbustivas (mais adaptadas à inundação que as florestas) e de herbáceas, o tipo de vegetação mais adaptado aos longos períodos de inundação anuais (Junk e Piedade 1997; Worbes 1997, Junk et al. 2012).

As plantas da várzea podem apresentar notável variação fenológica ao longo de um ciclo hidrológico (Worbes 1997; Junk e Piedade 1997, Schöngart et al. 2002), e essa dinâmica pode

ser utilizada para caracterizar quantitativa e qualitativamente esses alvos através de dados de sensoriamento remoto. Dados de radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar* - SAR) permitem o imageamento mesmo sob cobertura de nuvens, e apresentam certa capacidade de penetração no dossel da vegetação, sendo assim sensíveis à estrutura das plantas e sua condição de inundação (Hess et al. 1990, Henderson e Lewis 2008). A capacidade dos radares polarimétricos (PolSAR) em registrar a intensidade e a fase da onda retroespalhada em todas as combinações de polarizações aumenta a quantidade de informação sobre os alvos, e permite a melhor caracterização das mesmas, seja esta qualitativa ou quantitativa (Brisco et al. 2013, Furtado 2014).

Dessa maneira, o presente estudo pretende responder às seguintes perguntas:

- 1) Dados PolSAR de banda C são capazes de registrar as fases de cheia e seca da várzea amazônica e as mudanças fenológicas a ela associadas?
- 2) Que atributos polarimétricos permitem caracterizar de modo mais efetivo as modificações na vegetação associadas à alternância entre cheia e seca?

2. Metodologia de Trabalho

2.1. Área de Estudo

O Lago Grande de Curuai (LGC) (Figura 1) localiza-se ao sul do município de Óbidos, Pará. A região é representativa da planície de inundação do Baixo Amazonas, com presença de vegetação lenhosa e herbácea (Barbosa, 2005). A planície de inundação do LGC possui regime de inundação anual e monomodal. Entre maio e junho ocorre o máximo de inundação (época da cheia), e próximo a dezembro o menor nível (época da seca). A diferença das cotas do nível da água entre as duas épocas é de cerca de 5 a 7 metros, podendo variar anualmente em até 2 m (Barbosa, 2005).

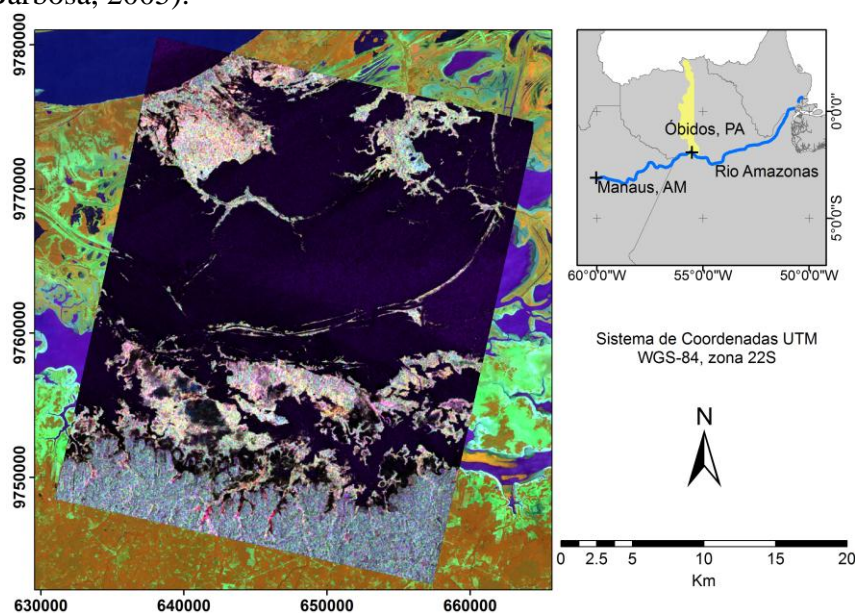


Figura 1 - Área de estudo. Imagem polarimétrica Radarsat-2, composição colorida R(HH)G(HV)B(VV). Ao fundo, composição colorida TM/Landsat-5 R(4)G(5)B(3). Os dados e produtos Radarsat-2 são licenciados para uso por MacDonal, Dettwiler e Associados, Ltd.

2.2. Dados de sensoriamento remoto

Foram utilizadas duas cenas Radarsat-2 (RS2) polarimétricas (banda C, 5.6 cm). As cenas foram obtidas nos dias 22 de junho (época da cheia) e 20 de outubro de 2011 (época da seca). As imagens polarimétricas possuem aproximadamente 8 x 5 m (range x azimuth) de

resolução, com ângulo de incidência de 25° (modo de imageamento SQ7). As cenas Radarsat-2 foram fornecidas através do programa *Science and Operational Applications Research (SOAR)*, coordenado pela *Canadian Space Agency (CSA)*, projeto número 5052.

O modelo de elevação digital Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) foi usado para a ortorretificação das cenas, com 90 m de resolução espacial e aproximadamente 16 metros de precisão vertical. Cenas Landsat5/TM e Landsat7/ETM+ do mesmo período de aquisição das imagens RS2 foram utilizadas para auxiliar na interpretação da cobertura da terra e na coleta de amostras de treinamento, assim como imagens disponíveis nas plataformas Google Earth™ e Microsoft Bing™.

2.3. Pré-processamento e geração dos gráficos *boxplot*

O pré processamento das imagens PolSAR baseou-se na metodologia de Furtado (2014) e consistiu em: (1) *multilooking* 1 x 4, respectivamente range e azimute; (2) cálculo da matriz C; (3) filtragem do efeito *speckle* utilizando o filtro *Refined Lee* com uma janela de operação de 5 x 5; (4) cálculo das decomposições polarimétricas; (5) transformação do nível digital para σ^0 (valores de retroespalhamento) e (6) ortorretificação. Foram utilizadas nesse trabalho, além das componentes da matriz C, as decomposições polarimétricas de *Freeman-Durden* (Freeman e Durden, 1998) e *Cloude-Pottier* (Cloude e Pottier, 1997). Essas duas decomposições foram escolhidas por serem largamente utilizadas em outros trabalhos da literatura.

A decomposição de Cloude-Pottier gera três componentes: o ângulo α , a entropia e a anisotropia. O ângulo α descreve o tipo de espalhamento principal do alvo, variando entre 0° (espalhamento superficial), 45° (volumétrico) e 90° (*double-bounce*). A entropia descreve a importância do espalhamento principal em relação aos demais tipos de espalhamento. Valores próximos de zero indicam maior contribuição do espalhamento principal em relação aos demais; valores próximos de um indicam proporcionalidade entre os tipos de espalhamento. A anisotropia, por sua vez, descreve a importância do espalhamento secundário em relação ao terciário. Valores de anisotropia próximos de zero mostram equivalência entre os mecanismos de espalhamento secundário e terciário; já valores elevados indicam maior importância do espalhamento secundário. A anisotropia só é válida para casos onde a entropia é maior do que 0.7; caso contrário deve ser desconsiderada da análise (Lee e Pottier, 2009).

A decomposição de Freeman-Durden, por sua vez, utiliza-se de modelos para simular o espalhamento de alvos naturais, tentando decompor o espalhamento total (*span*) em frações (1) *double-bounce*, (2) superficial e (3) volumétrico (Lee e Pottier, 2009).

O número mínimo de pixels para a geração dos gráficos foi calculado segundo Laur et al. (1996) para que o intervalo de confiança das amostras seja, com 95% de confiança, de +/- 1 dB. Para cada classe foram coletados uma média de 20 polígonos, totalizando mais de 1500 pixels para cada classe.

A Tabela 1 descreve as classes analisadas nesse trabalho.

3. Resultados e Discussão

Durante a época da cheia, as classes AB, FI e ME apresentam diversas adaptações metabólicas e fenológicas com relação à inundação. Algumas espécies das classes AB e FI podem apresentar queda de folhas e indivíduos de altura reduzida podem ser cobertos pela água, diminuindo assim, artificialmente, a densidade da floresta. É comum encontrar grandes bancos da classe ME, com densidade elevada e em pleno vigor vegetativo, sejam de indivíduos enraizados ou flutuantes.

Nessa fase, a presença da lâmina d'água embaixo do dossel gera condições favoráveis para a ocorrência de *double-bounces* para todas as classes de vegetação. Isso pode ser

observado nas componentes C11, C13 e C33 da matriz C (Figura 2), com valores elevados de retroespalhamento (-5 a -7 dB para C11, -12 dB em C13 e -7 dB em C33). O mesmo comportamento pode ser observado na componente *double-bounce* da decomposição de Freeman-Durden, (em torno de -10 dB) (Figura 5). Esta tendência é menos evidenciada pelo ângulo α (Figura 3) da decomposição de Cloude-Pottier, que varia entre 40 e 45 graus indicando espalhamento volumétrico. A classe com maior quantidade de *double-bounces* foi AB, seguida por ME, e a menor quantidade foi observada para FI. Os troncos ou caules mais finos e dosséis menos densos das classes AB e ME favorecem a ocorrência de *double-bounces* em banda C, quando comparados a FI. A altura de inundação também pode explicar essa diferença – como as florestas colonizam as áreas mais altas da várzea, alguns pontos podem ainda não estar inundados, diminuindo a mediana da classe.

Tabela 1 - Classes de cobertura do solo da várzea do Lago Grande de Curuai (PA)

Classe (abreviação)	Descrição	Nº de amostras (pixels)
Água (AG)	Água livre sem plantas aquáticas;	10966
Arbóreo-arbustivo (AB)	Formações arbóreo-arbustivas com indivíduos de altura reduzida, organizados em formações fechadas alternando-se com áreas abertas cobertas por herbáceas;	2068
Campos de várzea (CV)	Substrato coberto por água durante a cheia e que se expõe na seca, sendo habitado então por herbáceas;	3232
Floresta Inundável (FI)	Floresta sujeita a inundação, com densidade de indivíduos variável, localizada ao longo de diques e nas regiões mais altas da várzea;	3370
Macrófitas Emersas (ME)	Herbáceas anuais ou perenes, enraizadas ou não, com elevada densidade de indivíduos;	2083
Macrófitas Flutuantes (MF)	Herbáceas enraizadas ou não com menor densidade de indivíduos quando comparada com as Macrófitas Emersas	2358

Na época da seca, muitos indivíduos das classes FI e AB voltam a desenvolver folhas, e indivíduos mais baixos que outrora estavam cobertos por água ressurgem, aumentando a densidade do dossel. Para a classe ME, a diminuição do nível da água coincide com a senescência dos indivíduos, diminuindo a sua densidade. Por outro lado, o substrato exposto é comumente colonizado por espécies herbáceas terrestres.

A mudança mais notável na época da seca é a diminuição significativa do *double-bounce*, diminuindo a mediana do retroespalhamento para todas as classes de vegetação. A queda mais notável deu-se para a componente C11 da matriz C (diminuição de 2 a 3 dB) (Figura 2) e para a componente *double-bounce* da decomposição de Freeman-Durden (Figura 5), aproximadamente 5 dB para a classe ME. Houve também redução nos valores de ângulo α (cerca de 3 graus para todas as classes) e anisotropia (cerca de 0.2). Dado que a decomposição de Cloude-Pottier indicou como principal tipo de espalhamento o volumétrico, a diminuição da importância do espalhamento *double-bounce* tornou esse espalhamento secundário equivalente ao espalhamento superficial (terciário), diminuindo assim a anisotropia.

De uma maneira geral, não foi possível perceber mudanças significativas no espalhamento volumétrico das classes AB e FI na fase da seca, tanto pela análise da componente C22 da matriz C, em torno de -12.5 dB, quanto na componente volumétrica de Freeman-Durden (-5 a -7 dB). Houve uma pequena queda dos valores de ângulo α para essas classes na época de seca (em torno de 38°), mas como a entropia não apresentou mudanças significativas entre cheia e seca (valores próximos de 0.77), a diminuição do ângulo α pode estar associada à diminuição do espalhamento *double-bounce*, reduzindo a mediana das classes. Para a classe ME, nota-se uma diminuição mais intensa do espalhamento volumétrico,

com quedas de 2 a 3 dB para a componente C22 (Figura 2) e para a componente de espalhamento volumétrico. Para a decomposição de Cloude-Pottier, assim como nas classes AB e FI, não foi possível observar mudanças notáveis, tendo as três classes um padrão similar.

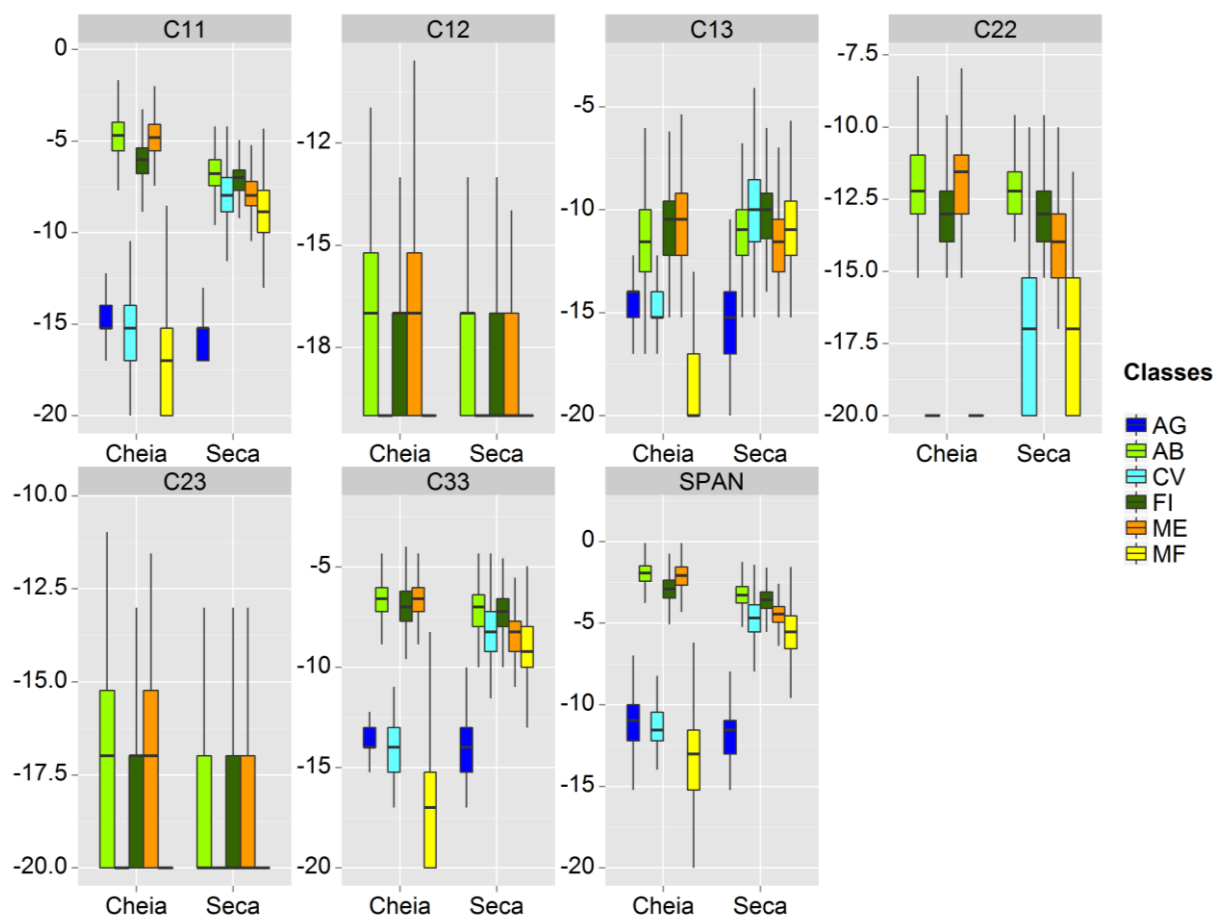


Figura 2 - Retroespalhamento das componentes da matriz C (em dB) para a várzea do Lago Grande de Curuai – PA, em imagens polarimétricas Radarsat-2, em banda C. As classes são: AG - água; AB - Arbóreo-arbustivo; CV - Campos de várzea; FI - Floresta Inundável; ME - Macrófitas Emersas; MF - Macrófitas Flutuantes.

Com relação a diferença de fase, percebe-se que há grande sobreposição e variabilidade dos valores para todas as classes (Figura 3), o que prejudica a análise com tais componentes (Hess et al. 1995, Touzi et al. 2009). Ainda assim, é possível perceber que as classes de vegetação possuem valores com maior módulo na época da cheia, caracterizando uma diferença de fase associada ao *double-bounce*. Na seca, percebe-se que há uma tendência de as classes aproximarem-se de 0° , mostrando a diminuição dos *double-bounces* e o aumento de outros tipos de espalhamento.

Durante o período de cheia, a água cobre grandes extensões da várzea, formando lagos e aumentando a largura dos canais dos rios. Muitos desses lagos e pequenos canais podem ser colonizados por macrófitas durante a cheia, com densidade de indivíduos reduzida. Com a chegada da seca, essas áreas são novamente expostas, tornando possível a colonização por herbáceas que crescem no substrato seco. Esse comportamento fica bastante claro para as classes MF e CV, principalmente por conta do aumento da rugosidade da superfície. Há um aumento considerável no retroespalhamento dessas classes nas componentes C11, C13 e C33 (Figura 2) podendo chegar a um aumento de até 10 dB na componente C33 para a classe MF.

Na componente de espalhamento superficial (Figura 5), o aumento chega a 12 dB para a classe CV.

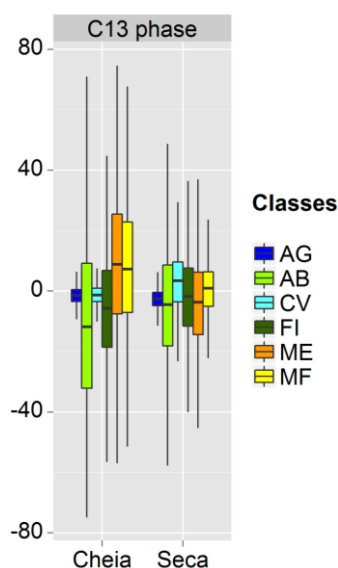


Figura 3 - Diferença de fase (em graus) da componente C13 da matriz C em imagens polarimétricas Radarsat-2, em banda C, para a várzea do Lago Grande de Curuai - PA. As classes são: AG - água; AB - Arbóreo-arbustivo; CV - Campos de várzea; FI - Floresta Inundável; ME - Macrófitas Emersas; MF - Macrófitas Flutuantes.

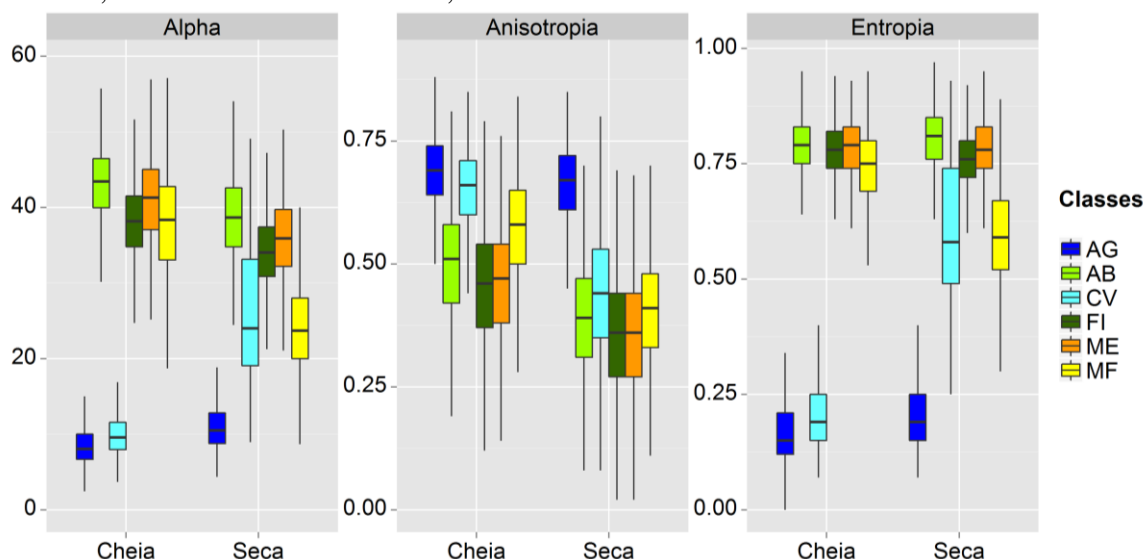


Figura 4 - Ângulo α (em graus), Anisotropia e Entropia (adimensionais) da decomposição de Cloude-Pottier para a vegetação da várzea do Lago Grande de Curuai – PA em imagens polarimétricas Radarsat-2, em banda C. As classes são: AG - água; AB - Arbóreo-arbustivo; CV - Campos de várzea; FI - Floresta Inundável; ME - Macrófitas Emersas; MF - Macrófitas Flutuantes.

Com relação à decomposição de Cloude-Pottier, percebe-se que há um aumento considerável do ângulo α para as classes CV e MF (cerca de 15 graus), mostrando que o espalhamento superficial, que era o dominante na época da cheia, vai gradualmente se transformando em volumétrico, na medida em que o substrato é exposto e colonizado por plantas herbáceas. A tendência é confirmada pelo aumento da entropia para a classe CV (de 0.2 a 0.55, aproximadamente), indicando aumento da importância dos espalhamentos

volumétrico e *double-bounce* (secundários) com relação ao primário (superficial). Como a entropia para essas classes é menor que 0.7, a anisotropia deve ser descartada dessa análise.

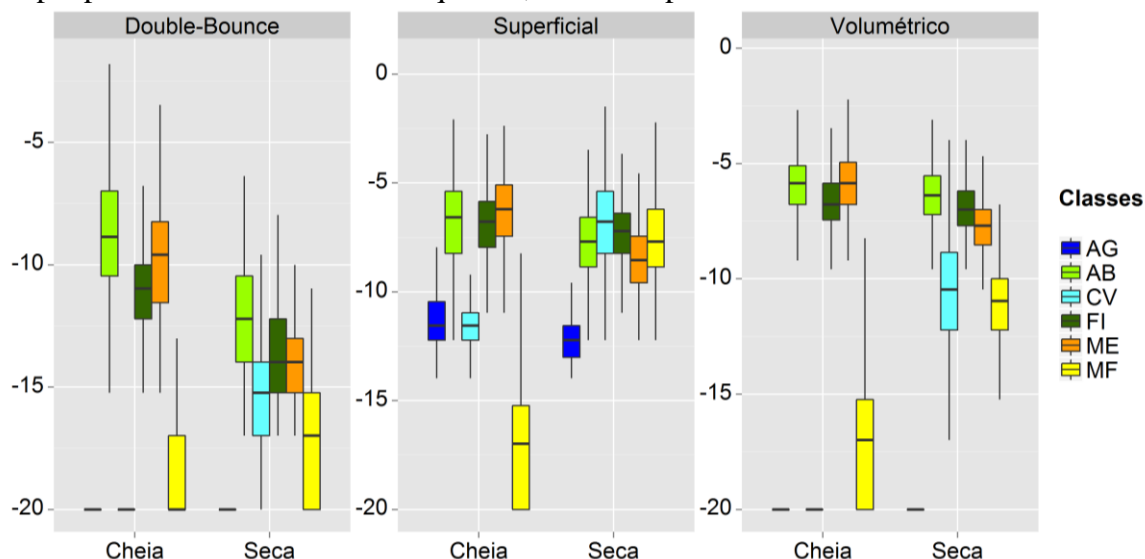


Figura 5 - Retroespalhamento (em dB) das imagens double-bounce, superficial e volumétricas da decomposição de Freeman-Durden para a vegetação da várzea do Lago Grande de Curuai – PA em imagens polarimétricas Radarsat-2, em banda C. As classes são: AG - água; AB - Arbóreo-arbustivo; CV - Campos de várzea; FI - Floresta Inundável; ME - Macrófitas Emersas; MF - Macrófitas Flutuantes.

4. Conclusões

Percebe-se que dados PolSAR são sensíveis às mudanças do nível da água causadas pela alternância dos períodos da cheia e da seca e às mudanças fenológicas das plantas herbáceas, mas não se notou alterações expressivas nos dosséis das florestas e formações arbustivas, principalmente pelas espécies decíduas e perenes estarem contidas nas mesmas classes. Dentre os atributos polarimétricos utilizados nesse trabalho, a decomposição de Cloude-Pottier foi a menos sensível às mudanças na vegetação, e a decomposição de Freeman-Durden, a mais sensível e detalhada.

Tais resultados mostram que é possível registrar grande parte das dinâmicas sazonais da várzea com resultados satisfatórios em imagens PolSAR, sendo possível utilizar tais imagens para caracterizar e mapear regiões da várzea não exploradas em campo e/ou associar tais mudanças radiométricas com atributos dendrométricos e estruturais, fornecendo uma descrição contínua e quantitativa da vegetação de várzea amazônica.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa cedida ao M.Sc. Luiz Felipe de Almeida Furtado, programa PCI/INPE processo número 302543/2014-7.

Referências

Barbosa, C. C. F. **Sensoriamento remoto da dinâmica de circulação da água do sistema planície de Curuai/Rio Amazonas**. 2005. 286p. (INPE – 14614 – TDI/1193). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

Brisco, B.; Li, K.; Tedford, B.; Charbonneau, F.; Yun, S.; Murnaghan, K. Compact polarimetry assessment for Rice and wetland mapping. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 6, p. 1949-1964, 2013.

Cloude, S. R.; Pottier, E. An Entropy Based Classification Scheme for Land Applications of Polarimetric SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 1, p. 68–78, 1997.

Freeman, A.; Durden, S. L. A Three-Component Scattering Model for Polarimetric SAR Data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.36, n.3, p.963–973, 1998.

Furtado, L. F. A. Mapeamento e modelagem da estrutura da vegetação na várzea Amazônica utilizando dados polarimétricos de banda C. 2014. 184 p. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/02.17.19.38-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2014.

Henderson, F.; Lewis, A. Radar detection of wetland ecosystems: a review. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 20, p. 5809-5835, 2008.

Hess, L. L.; Melack, J. M.; Filoso, S.; Wang, Y. Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C synthetic aperture radar. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 4, p. 893-904, 1995.

Hess, L. L.; Melack, J. M.; Simonett, D. S. Radar detection of flooding beneath the forest canopy: a review. **International Journal of Remote Sensing**, v. 11, n. 7, p. 1313-1325, 1990.

Junk, W. J. General aspects of floodplain ecology with special reference to Amazonian floodplains. In: Junk, W. J. (Ed). **The central Amazon floodplain: ecology of a pulsing system**. Berlin: Springer, 1997. Cap. 1, p.3-22.

Junk, W. J.; Bayley, P. B.; Sparks, R. E. The flood pulse concept in river-floodplain systems. **Canadian Special Publications in Fisheries and Aquatic Sciences**, v.106, p.110-127, 1989.

Junk, W. J.; Piedade, M. T. F.; Schöngart, J.; Wittmann, F. A classification of major natural habitats of Amazonian white-water river floodplains (várzeas). **Wetlands Ecology and Management**, v. 20, n. 6, p. 461-475, 2012.

Junk, W. J.; Piedade, M. T. F. Plant life in the floodplain with special reference to herbaceous plants. In: Junk, W. J. (Ed). **The central Amazon floodplain: ecology of a pulsing system**. Berlin: Springer, 1997. Cap. 8, p.147-186.

Melack, J. M.; Hess, L. L. Remote sensing of the distribution and extent of wetlands in the Amazon basin. In: Junk, W. J. et al. (Ed). **Amazonian floodplain forests: ecophysiology, biodiversity and sustainable management**. New York: Springer Verlag, 2010. Cap. 3, p.43-60.

Melack, J. M.; Hess, L. L.; Gastil, M.; Forsberg, B.; Hamilton, S. K.; Lima, I. B. T.; Novo, E. M. L. M. Regionalization of methane emissions in the Amazon Basin with microwave remote sensing. **Global Change Biology**, v. 10, n. 5, p. 530-544, 2004.

Richey, J. E.; Melack, J. M.; Aufdenkampe, A. K.; Ballester, V. M.; Hess, L. L. Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO₂. **Letters to Nature**, v. 416, p. 617-620, 2002. Schöngart, J.; Piedade, M. T. F.; Ludwigshausen, S.; Horna, V.; Worbes, M. Phenology and stem-growth periodicity of tree species in Amazonian floodplain forests. **Journal of Tropical Ecology**, v. 18, n. 4, p. 581–597, 2002.

Wittmann, F.; Junk, W. J.; Piedade, M. T. F. The várzea forests in Amazonia: flooding and the highly dynamic geomorphology interact with natural forest succession. **Forest Ecology and Management**, v. 196, n. 2-3, p. 199-212, 2004.

Wittmann, F.; Schöngart, J.; & Junk, W. J. Phytogeography, species diversity, community structure and dynamics of central Amazonian floodplain forests. In Junk, W. J.; Piedade, M. T. F.; Wittmann, F.; Schöngart, J.; Parolin, P. (Eds.). **Amazonian floodplain forests: ecophysiology, biodiversity and sustainable management**. New York, NY: Springer Verlag., 2010. Cap. 4, p. 61-102.

Worbes, M. The forest ecosystem of the floodplains. In: Junk, W. J. (Ed). **The central Amazon floodplain: ecology of a pulsing system**. Berlin: Springer, 1997. Cap. 11, p.223-266.