



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

---

**TESE DE DOUTORADO Nº 141**

**O POTENCIAL DO SENSORIAMENTO REMOTO SAR NO  
MAPEAMENTO, DISCRIMINAÇÃO DE GÊNEROS E  
ESTUDO DA DINÂMICA DE FLORESTA DE MANGUE NA  
REGIÃO AMAZÔNICA.**

**Tese apresentada por:**

**MICHELE FERREIRA COUGO**

**Orientador: Prof. Dr. Pedro Walfir M. Souza Filho (IG – UFPA)**

**Coorientador: Prof. Dr. Marcus Emanuel B. Fernandes (IECOS – UFPA)**

---

**Belém-PA**

**2019**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**  
**Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

- C853p Cougo, Michele Ferreira.  
O potencial do sensoriamento remoto SAR no mapeamento, discriminação de gêneros e estudo da dinâmica de floresta de mangue na região Amazônica / Michele Ferreira Cougo. — 2019.  
xx, 110 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Pedro Walfir Martins E Souza Filho  
Coorientador(a): Prof. Dr. Marcus Emmanuel B. Fernandes  
Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.
1. Radar de abertura sintética. 2. Série temporal Sentinel1. 3. Manguezal. 4. Random Forest. 5. Biomassa. I. Título.

---

CDD 621.3678



**Universidade Federal do Pará**  
**Instituto de Geociências**  
**Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica**

**O POTENCIAL DO SENSORIAMENTO REMOTO SAR NO  
MAPEAMENTO, DISCRIMINAÇÃO DE GÊNEROS E  
ESTUDO DA DINÂMICA DE FLORESTA DE MANGUE NA  
REGIÃO AMAZÔNICA**

**Tese apresentada por**

**MICHELE FERREIRA COUGO**

**Como requisito parcial à obtenção de Grau de Doutora em Ciências na Área de GEOLOGIA**

**Data de Aprovação: 26 / 04 / 2019**

**Banca Examinadora:**

**Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e S. Filho**  
**(Orientador- UFPA)**

**Prof.ª Dr.ª Moirah Paula M. de Menezes**  
**(Membro-UFPA)**

**Prof. Dr. João Roberto dos Santos**  
**(Membro-INPE)**

**Prof. Dr. Arnaldo de Queiroz da Silva**  
**(Membro-UFPA)**

**Prof. Dr. Nils Edvin Asp Neto**  
**(Membro-UFPA)**

*“À minha Mãe pela sintonia e sensibilidade  
sabendo mais de mim do que eu.  
Ao meu Pai pela confiança nas minhas  
escolhas”*

## AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

Ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências e à Universidade Federal do Pará pela oportunidade de desenvolvimento desta tese.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela concessão da bolsa de Doutorado.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela concessão da bolsa do Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE) – Código de Financiamento 001.

A empresa *Airbus Defense and Space* por ceder as imagens *Terrasar-X*.

Ao Prof. Dr. Pedro Walfir pela oportunidade de seguir trabalhando juntos, aceitando-me para o doutorado, pela liberdade de trabalho, por me impulsionar para sair da zona de conforto e descobrir novos horizontes, pela tranquilidade, paciência e compreensão no momento em que quase desisti.

Ao Prof. Dr. Marcus Fernandes por toda a atenção e disponibilidade, de tempo, do espaço no laboratório e por me acolher sempre que precisei em Bragança. Agradeço por todas as discussões e conversas para sanar minhas dúvidas sobre esse ecossistema tão fascinante que é o manguezal.

Aos Prof. Dr. Arnaldo Queiroz por aceitar o convite de estar na banca, pelas contribuições na etapa da qualificação e pelo esforço em ampliar meus conhecimentos, como no momento do curso de *SARscape* e também por me colocar em contato com pessoas da área.

Ao Prof. Dr. João Roberto dos Santos por aceitar o convite para a banca, pelas contribuições na qualificação e pelas tantas indicações de leitura.

À Profa. Dra. Moirah Menezes por aceitar o convite para a banca e pelas contribuições na qualificação.

Ao Prof. Dr. Nils Asp por aceitar participar da banca e pela disposição em ajudar nos tantos campos que fiz em Bragança.

Aos integrantes do Laboratório de Geologia Costeira (LAGECO) pelas ajudas na organização de campo, pela disposição de entrar na lama fazer levantamento e/ou buscar equipamentos e ajudar no processamento dos dados.

Aos integrantes do Laboratório de Ecologia de Manguezal (LAMA), especialmente ao Danilo

Gardunho e ao Diego Carneiro pelos inventários da vegetação de mangue.

Ao Prof. Dr. Laurent Polidori por aceitar o convite para o Doutorado Sanduíche, pelo acolhimento no Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO) - França, pela atenção e por todas as conversas que me acalmaram durante esta etapa intensa da tese, as quais me ajudaram a ver além dos resultados. Ao Dr. Ludovic Villard por aceitar ser meu tutor, pela disponibilidade e pela paciência com meu francês quando cheguei. Aos dois, Laurent e Ludovic, agradeço a colaboração no capítulo 5 desta tese, "*Série temporal Sentinell no estudo das florestas de mangue do litoral Amazônico*" que foi idealizado, desenvolvido e os resultados preliminares discutidos durante esta etapa.

A toda equipe BIOMASS do CESBIO, Dra. Thuy Le Toan, Dr. Stephane Mermoz, Dr. Alexandre Bouvet, Dr. Thierry Koleck e Dra. Milena Planells pela acolhida, receptividade e disponibilidade de discutir os resultados do trabalho. Ao David Morin pelas conversas a cerca da temática biomassa/multissensor e tantas trocas importantes. Ao Lucas Chamon que me guiou nos meus primeiros passos no software R.

Agradeço, especialmente, à Marie Ballere pela sincera e linda amizade, por todas as dicas, todas as conversas e ajudas sobre e no trabalho. Je suis très contente t'avoir connue, tu est super Marie!!

A todos os amigos que, como eu, estavam de passagem no CESBIO, Lola, Enric, Bouchra, Zoubair, Simon, Hakim e Marine, amigos de trocas de experiências, dividindo frustrações, mas também alegrias e felicidades durante o café com chocolate. Não poderia esquecer de agradecer a Laurence Keppel pelas ajudas com toda a burocracia e também por divertir a todos com quem fala.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Imagens do Trópico Úmido (LAIT), Paulo, João, Carlos, Gustavo e Francisco, em especial ao Wilson por tantas conversas em momento de crise e pela disponibilidade para os campos e à Glenda por toda ajuda e disposição neste período. Foram 8 anos neste laboratório, agradeço a cada pessoa com quem interagi durante minha formação.

Agradeço às secretárias do PPGG, Cleida e Joanicy, que sempre foram solícitas em me auxiliar nos momentos que a burocracia parecia não andar.

À minha amiga Thiely pela amizade e companheirismo nessa caminhada do Doutorado e na vida, dividindo preocupações, frustrações, felicidades e conquistas. Obrigada amiga tu és

demais!

A Rafaela, Rafinha, pelo companheirismo e por todas as conversas com relação aos avanços na temática do trabalho.

A todas as amigas que de alguma forma me deram força para desenvolver e concluir o Doutorado, Sol, Thiara, Denise, Mônica, Maria, Anne, Amintas, Fabrício, Amanda, Cristiane, Gabriela, Luciara, Antônio, Dea, Dan, Ana, Taiana, Bia, Karol, Neila, Nathalia e tantos outros que sempre estiveram ao meu lado, no norte, no sul ou do outro lado do Atlântico.

À Dalva e Heribert, por me acolherem como filha sempre com tanto carinho e alegria, por me acompanharem em muitos momentos importantes dessa jornada e por, nestes últimos meses, me darem asilo para finalizar a tese. À Marly pelo carinho no dia a dia.

Ao meu companheiro Fred pelo amor, por ouvir todas minhas lamentações, me tranquilizar e sempre me fazer sorrir de novo, foste essencial nessa finalização.

Agradeço à estrutura familiar que me fez chegar aqui, minha mãe, Nazionélia Ferreira, pelo seu olhar sensível e atencioso a cada passo meu, por tentar sempre que eu não esqueça o tamanho das minhas conquistas, pelo amor, carinho e dedicação como mãe, amiga e companheira de vida. Ao meu pai, Valmir Cougo, por todo amor e por não medir esforços em ver meus sonhos se tornando realidade, pela confiança e tranquilidade diante dos desafios que eu resolvi encarar. Aos meus irmãos Caroline, Lorena e Felipe, que cada um com seu jeito sempre me deram forças para continuar. À Catarina, pelo olhar que me fez ver a vida de maneira diferente e que sempre me dá força para seguir. Obrigada, família, por não me prender fisicamente ao lado de vocês e por sempre me impulsionar para seguir esta caminhada longe de casa, meu coração sempre esteve com vocês.

*“Apenas nos pusimos en dos pies  
Y nos vimos en la sombra de la hoguera  
Escuchamos la voz del desafío  
Siempre miramos al río, pensando en la otra rivera*

*Somos una especie en viaje  
No tenemos pertenencias, sino equipaje  
Vamos con el polen en el viento  
Estamos vivos porque estamos en movimiento  
...  
Es más mío lo que sueño, que lo que toco”*

Movimiento – Jorge Drexler



## RESUMO

Esta tese tem como objetivo geral abordar o potencial dos dados de sensores SAR para diferenciar gêneros de mangue através de dados polarimétricos, estimativa de biomassa através da estrutura dos bosques e em produzir mapas temáticos as florestas de mangue através do uso de imagens SAR multifrequência. Dados SAR polarimétricos (Radarsat2), multifrequência (banda X, C e L) foram utilizados para cumprir este objetivo. A área de estudo é a península de Ajuruteua, localizada no setor leste da Zona Costeira Amazônica. Os manguezais desta região são considerados preservados e estão presentes as espécies: *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Avicennia schaueriana* e *Laguncularia racemosa*, sendo a espécie *R. mangle* a espécie dominante na região. Através de uma imagem polarimétrica Radarsat-2, banda C, foram avaliadas as respostas polarimétricas das parcelas com dominância dos dois principais gêneros ocorrentes na região (*Rhizophora* e *Avicennia*). Pela análise dos gráficos das respostas polarimétricas não foi possível definir um padrão por gênero que permitisse a diferenciação de gêneros através deste parâmetro. A análise do mecanismo de espalhamento foi realizada através das decomposições polarimétricas da matriz de coerência e covariância. No plano H- $\alpha$  todas as parcelas de vegetação foram classificadas na zona 5 de média entropia, zona atribuída ao espalhamento da vegetação e, na zona 6 de média entropia associada ao aumento da rugosidade superficial. Apenas a classe campos apresentou valor de H menor que as demais classes, o que à destacou das demais. As imagens dos mecanismos de espalhamento: *double-bounce*, volumétrico e superficial não permitiram a separação dos gêneros dominantes na região. Na série temporal anual de imagens Sentinel1-A o comportamento do  $\sigma^\circ$  nas polarizações VV e VH foi similar e não apresentou diferenças com relação a valores de biomassa total. As variações dos valores de retroespalhamento ao longo do ano foram relacionados as condições ambientais (precipitação e regime das marés), alterações no dossel (fenologia) e ao ângulo de incidência. Os valores de  $\sigma^\circ$  foram maiores no período do mês de maio ao fim de agosto e no mesmo período os valores da razão  $\sigma^\circ_{VH}/\sigma^\circ_{VV}$  foram menores, reflexo da dinâmica do dossel dos manguezais da região visto que este período é marcado pela maior produção de serrapilheira, apesar da modesta oscilação (1,5 dB). O uso das imagens SAR multifrequência para classificação no Random Forest dos ambientes da península baseada teve o melhor índice Kappa com valor de 0,53 para o modelo

que incluiu imagens Sentinel1-A e ALOS-PALSAR, com Kappa da classe mangue de 0.90. A classe mangue não apresentou discordância global (até 10%) mais alta que as demais, principalmente no tipo permuta com as classes mangue, planície hipersalina e outros, sendo que as duas últimas tiveram os menores índices Kappa por classe em todas as classificações. A classe mangue apresentou discordância global de no máximo 5% e índice Kappa maior que 0,90 em todas as classificações. Diante do exposto, concluímos que a abordagem por gênero de mangue, mesmo com elevado n amostral, não produz diferenças significativas para a distinção dos gêneros através de técnicas polarimétricas, quer seja resposta polarimétrica ou técnicas de decomposição. Dois avanços podem ser ressaltados no estudo dos manguezais através de séries temporais Sentinel-1A, a razão de polarização  $\sigma^{\circ}_{VH}/\sigma^{\circ}_{VV}$  está relacionada a dinâmica do dossel e o uso de imagens trimestrais de estações diferentes para a classificação das florestas de mangue. Além de ser reconhecido o potencial de uso das imagens SAR para o mapeamento das florestas de mangue principalmente quando utilizadas séries temporais de sensores nas bandas C e L através de técnicas de aprendizado de máquina.

Palavras-chave: Synthetic Aperture Radar. Manguezal. Série temporal Sentinel1. Random Forest. Biomassa. Polarimetria SAR.

## ABSTRACT

This dissertation examines the potential of data generated from SAR sensors to differentiate between mangrove genera using polarimetric data, biomass estimates based on forest structure, and by producing thematic mangrove forest maps, using multi-frequency SAR images. Polarimetric SAR data (Radarsat2), multi-frequency (bands X, C and L) were used to achieve this goal. The study area is the Ajuruteua Peninsula, located in the eastern sector of the Amazon Coastal Zone. Mangroves in this region are considered preserved with the following species present: *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Avicennia schaueriana* and *Laguncularia racemose*, where *R. mangle* is the dominant species in this region. Through the polarimetric image Radarsat-2, band C, the polarimetric response of the parcels, dominated by these two principal genera (*Rhizophora* e *Avicennia*), were analyzed. Through the analysis of the polarimetric response, we were unable to define a pattern per genus to allow for the differentiation of the genera using this parameter. Analysis of the scattering mechanism was conducted through polarimetric decomposition of the coherence and covariance matrix. In the  $H-\alpha$  plane, all vegetation parcels were classified as zone 5 of average entropy, attributed to vegetation scattering, and as zone 6, also of average entropy, associated to an increase in the surface-level roughness. Only the field class presented an H value lower than the other classes, standing out from the others. The images of scattering mechanisms: double-bounce, volumetric and surface-level did not permit the separation of dominant genera in the region. Using annual time series images Sentinel1-A, the behavior of the  $\sigma^\circ$  polarizations VV and VH were similar and did not present differences in relation to total biomass values. Variations in radar backscatter over the year were related to environmental conditions (precipitation and tidal regime), canopy alterations (phenology) and incidence angle. The  $\sigma^\circ$  values were greater during the month of May to the end of August, and in the same period,  $\sigma^\circ_{VH}/\sigma^\circ_{VV}$  rate values were lower, which is a reflex of mangrove canopy dynamics in the region given that during this period leaf litter production is greater, despite modest oscillation (1.5 dB). The use of multi-frequency SAR images for Random Forest classification of the environments on the peninsula resulted in the best Kappa index, 0.53, for the model that included the Sentinel1-A and ALOS-PALSAR images, with a Kappa mangrove class of 0.90. The dwarf mangrove class presented a global disagreement (up to

10%) higher than the others, principally in types exchange with mangrove classes, hypersaline plains and others, being that the last two had the lowest Kappa indices per class in all the classifications. The mangrove class showed a global disagreement maximum of 5% and a Kappa index greater than 0.90 in all classifications. Based on the above considerations, we conclude that the mangrove genera approach, even with a greater n sample, did not produced significant differences to distinguish genera through polarimetric techniques, be them polarimetric responses or scatter techniques. Two advances can be identified in the study of mangroves using time-series Sentinel-1A:  $\sigma_{\text{VH}}^{\circ}/\sigma_{\text{VV}}^{\circ}$  polarization rate is related to canopy dynamics, and the use of trimester images, representing different seasons for the classification of mangrove forests. In addition, the potential of SAR images for mapping mangrove forests using time-series images from C and L bands through machine learning techniques is also recognized.

Keywords: Synthetic Aperture Radar. Mangrove. Sentinell time-series. Random Forest. Biomass. Polarimetric SAR.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA

## PARECER

### Sobre a Defesa Pública da Tese de Doutorado de MICHELE FERREIRA COUGO

A banca examinadora da Tese de Doutorado de **MICHELE FERREIRA COUGO** orientanda do Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho (UFPA), composta pelos professores doutores João Roberto dos Santos (INPE), Moirah Paula Machado de Menezes (UFPA), Nils Edvin Asp Neto (UFPA) e Arnaldo de Queiroz da Silva (UFPA), após apresentação da sua tese intitulada "**O POTENCIAL DO SENSORIAMENTO REMOTO SAR NO MAPEAMENTO, DISCRIMINAÇÃO DE GÊNEROS E ESTUDO DA DINÂMICA DE FLORESTA DE MANGUE NA REGIÃO AMAZÔNICA**", emite o seguinte parecer:

A candidata realizou sua apresentação de forma clara, bem organizada e segura. Na arguição mostrou domínio no processamento e análise de imagens de radar voltadas para o estudo dos manguezais e respondeu perguntas formuladas pela banca. O trabalho escrito foi apresentado na forma tradicional e atende as exigências para uma tese de doutorado.

Finalmente, a banca examinadora decidiu por unanimidade aprovar a tese de doutorado.

Belém, 26 de abril de 2019.

Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho (Orientador – UFPA)

Prof. Dr. João Roberto dos Santos (INPE)

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Moirah Paula Machado de Menezes (UFPA)

Prof. Dr. Nils Edvin Asp Neto (UFPA)

Prof. Dr. Arnaldo de Queiroz da Silva (UFPA)