



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE
MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

**ANÁLISE DOS MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIE GERADOS POR
INTERFEROMETRIA E RADARGRAMETRIA NO ESTUDO DE AMBIENTES
COSTEIROS AMAZÔNICOS**



Presidente Prudente

2017

ULISSES SILVA GUIMARÃES

**ANÁLISE DOS MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIE GERADOS POR
INTERFEROMETRIA E RADARGRAMETRIA NO ESTUDO DE AMBIENTES
COSTEIROS AMAZÔNICOS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Campus de Presidente Prudente, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências Cartográficas. Área de concentração em Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais

Orientadora: Profa. Dra. Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo

Presidente Prudente

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Guimarães, Ulisses Silva.

G981a Análise dos modelos digitais de superfície gerados por interferometria e radargrametria no estudo de ambientes costeiros amazônicos / Ulisses Silva Guimarães. - Presidente Prudente : [s.n], 2017
189 f. : il.

Orientador: Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo
Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Inclui bibliografia

1. Radar de abertura sintética. 2. Interferometria. 3. Radargrametria. 4. Ambientes Costeiros Amazônicos. I. Guimarães, Ulisses Silva. II. Galo, Maria de Lourdes Bueno Trindade. III. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. IV. Análise dos modelos digitais de superfície gerados por interferometria e radargrametria no estudo de ambientes costeiros amazônicos.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

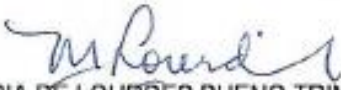
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: **ANÁLISE DOS MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIE GERADOS POR INTERFEROMETRIA E RADARGRAMETRIA NO ESTUDO DE AMBIENTES COSTEIROS AMAZÔNICOS**


AUTOR: ULISSES SILVA GUIMARÃES

ORIENTADORA: MARIA DE LOURDES BUENO TRINDADE GALO


Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS, área: AQUISIÇÃO, ANÁLISE E REPRESENTAÇÃO DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS pela Comissão Examinadora:


Prof. Dra. MARIA DE LOURDES BUENO TRINDADE GALO
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente


Prof. Dr. NILTON NOBUHIRO IMAI
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente


Prof. Dr. PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente


Prof. Dr. ARNALDO DE QUEIROZ DA SILVA
Instituto de Geociências / Universidade Federal do Pará


DR. IGOR DA SILVA NARVAES
Centro Regional da Amazonia / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Presidente Prudente, 06 de março de 2017

À Deus.

Aos meus pais e irmãos, por todo apoio e amor dedicado.

À minha esposa e amiga por todo amor, paciência e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Ao Pai Celestial por seu amor e suas bênçãos em minha vida.

A minha mãe Teonice Guimarães e meu pai Pedro Paulo Guimarães, por sempre me incentivar com grande amor na busca de minha formação e do trabalho digno.

A minha esposa Thanan pelo amor, dedicação, incentivo e companheirismo, ao seu lado esta etapa de nossas vidas foi inesquecível, repleta de aprendizagem e nos tornando pessoas melhores.

A minha orientadora Profa. Dra. Maria de Lourdes que compartilhou seu conhecimento, experiências e demonstrou confiança e amizade, e, sobretudo, dedicação e compromisso.

A Universidade Estadual Paulista, em seu Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia em Presidente Prudente, pela estrutura e apoio fornecidos nas disciplinas internas e externas, nas participações de simpósios e congressos e no meu trabalho de campo.

Agradeço à *Agenzia Spaziale Italiana (ASI)* e *Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR)* pela cessão de dados Cosmo-Skymed e TerraSAR-X.

Ao Sistema de Proteção da Amazônia que possibilitou meu aperfeiçoamento profissional e a realização desta tese de doutorado com o apoio estrutural e técnico, em especial agradecimento ao diretor geral Rogério Guedes e aos grandes companheiros de trabalho do Centro Regional de Belém e Centro de Coordenação Geral de Brasília.

Aos amigos do SIPAM pelas discussões técnicas em geotecnologias, ensinamentos e cooperação nas atividades desenvolvidas, entre eles: Nicola Tancredi, Flávio Altieri, Carlos Tamazauska e Eduardo Santos. Em especial a Shirley Santos, Luis Mancini e Dona Nenzinha pela amizade.

Aos amigos das ciências cartográficas por toda dedicação em repassar conhecimento, discussões, apoio nas disciplinas, entre eles: Érico Martins, Henrique Candido, George Deroco, Raquel Oliveira, Luiz Rotta e Fernanda Watanabe. Em especial agradecimento ao amigo Valmir Lira no trabalho de campo e o Marcus Moraes pela grande contribuição na aquisição e tratamento dos dados GNSS.

Ao INPE por propiciar formação de pesquisadores na área de sensoriamento remoto por microondas, entre eles um agradecimento especial nas discussões e ensinamentos para os professores Dr. Waldir Paradela, Dr. Claudio Mura e Dr. Fábio Gama.

Ao meu grande amigo Mariano Rocha, companheiro das batalhas mais difíceis, obrigado pelo apoio no trabalho de campo e discussões.

*And I know I'll get no justice here,
so I will let the gods decide my fate.
I demand a trial by combat!*

*Tyrion Lannister (George R. R.
Martin)*

RESUMO

A Zona Costeira Amazônica (ZCA) é marcada por uma alta descarga de sedimentos e água doce sob a influência do rio Amazonas, possui ampla plataforma continental, extensas planícies de inundação e planaltos rebaixados. É uma região de clima tropical, caracterizando-se por chuvas e nebulosidade severas, além da influência de macromarés. Este estudo propõe-se a avaliar a precisão de Modelos Digitais de Superfícies (MDSs), elaborados a partir de dados de radar de abertura sintética (SAR) Cosmo-SkyMed (CSK) e TerraSAR-X (TSX), utilizando abordagens de reconstrução tridimensional por interferometria e radargrametria, para caracterizar esse relevo plano e dinâmico da costa amazônica. O estudo foi desenvolvido em quatro experimentos contemplando: i) as variações de linha de costa por meio de detecção de mudanças a partir de imagens ópticas; ii) mapeamento de ambientes costeiros; iii) elaboração e análise de MDSs interferométricos e iv) radargramétricos, por meio das suas respectivas cadeias de processamento SAR. A ZCA teve forte dinâmica nos últimos 15 anos, com acreção total de 5.582,18 km² e sob a taxa de 372,15 km².ano⁻¹, erosão total de 5.475,90 km² e sob taxa de 365,06 km².ano⁻¹, resultando no balanço sedimentar de 106,27 km², com taxa de 7,08 km².ano⁻¹. O setor Insular Estuarino apresentou a maior dinâmica de linha de costa, com mudanças costeiras de 213,17±56,46 km² e balanço sedimentar de 20,65±73,59 km². Os ambientes costeiros amazônicos foram descritos pelo retroespalhamento e pela coerência, os quais compartilharam alta ambiguidade e dispersão elevada, sendo o pior caso de separabilidade e baixa coerência registrado para Planície Costeira. O mapeamento dos diferentes ambientes costeiros resultou em coeficiente *Kappa* entre 0,46 a 0,51, apontando os ângulos de incidência rasantes e o período seco como mais apropriados para o estudo. Os MDSs interferométricos e radargramétricos foram elaborados em passagens múltiplas de única revisita com compromissos entre ângulos de incidência, linha de base espacial e decorrelação temporal. A acurácia vertical foi realizada por testes estatísticos pareados com levantamentos de campo que resultou em discrepâncias, viés e precisão compatíveis com o Padrão de Exatidão Cartográfica Brasileiro para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), em adição, os MDS foram comparados por meio dos diagramas de Taylor e Alvo. Os MDSs interferométricos alcançaram RMSE entre 9,57 e 25,18 m, com melhor desempenho para o MDS CSK, adquirido com 1 dia de revisita, ângulo de incidência íngreme, no período chuvoso e compatível a escala de 1:50.000, classe A. Entretanto, a abordagem interferométrica não foi capaz de solucionar a reconstrução tridimensional de ambientes que se mostraram incoerentes. Os modelos radargramétricos obtidos pelas abordagens do SARscape e Toutin alcançaram RMSE entre 4,34 e 7,76 m, com melhor desempenho para os modelos de Toutin, que foram compatíveis com a escala 1:50.000, classe A. A radargrametria permitiu a reconstrução tridimensional contínua, incluindo a Planície Costeira de comportamento incoerente. A comparação dos MDSs por meio dos diagramas de Taylor e Alvo, mostrou variações de precisão entre os sistemas CSK e TSX, e suas respectivas condições de aquisição e modelos, com destaque à menor variabilidade e ajuste da correlação para MDSs do sistema TSX, em incidências rasantes, no período seco e gerados pelo modelo de Toutin. O Tabuleiro Costeiro e Terraço Fluvioamarinho apresentaram menor erro vertical entre 3,89 e 28,59 m, e entre 3,79 e 20,33 m, respectivamente, enquanto que a Planície Costeira teve maior RMSE entre 4,16 e 26,24 m. O Tabuleiro Costeiro foi o ambiente costeiro mais adequado para estimar altura, com posições plotadas próximas as referências de campo. Os dados CSK e TSX permitiram mapear o relevo plano e dinâmico da ZCA, por meio da banda X, alta resolução espacial e revisita, o que demonstrou o suporte para cartografar em detalhe de escala espacial (1:50.000) e frequente atualização (semestral a anual).

Palavras-chave: Radar de Abertura Sintética, Interferometria, Radargrametria, Ambientes Costeiros Amazônicos.

ABSTRACT

The Amazon Coastal Zone (ACZ) is marked by a high discharge of sediments and fresh water under the influence of the Amazon River, which has a wide continental shelf, extensive flood plain and lowered plateaus. It is a region of tropical climate, rainfall, severe cloudiness and macrotidal influence. This study proposes to assess the performance of Digital Surface Models (DSM) based on Cosmo-SkyMed (CSK) and TerraSAR-X (TSX) dataset, using three-dimensional reconstruction by interferometry and radargrammetry approaches on the flat and dynamic relief of Amazonian coast. The method focused on four experiments: i) shoreline variations through change detection of optical images, ii) mapping of coastal environments; iii) elaboration and analyses of interferometric DSMs and iv) radargrammetric through their respective Synthetic Aperture Radar (SAR) processing chains. The ACZ had high dynamic in the last 15 years with total sediment deposition of 5,582.18 km² and under a rate of 372.15 km².yr⁻¹, and with total erosion of 5,475.90 km² and under a rate of 365.06 km².yr⁻¹. Besides, it was obtained a sedimentary balance of 106.27 km² and under a rate of 7.08 km².yr⁻¹. The Estuarine Insular sector presented the greater dynamics of shoreline, registering coastal changes of 213.17 ± 56.46 km² and sedimentary balance of 20.65 ± 73.59 km². The Amazonian coastal environments were described by backscattering and coherence which shared ambiguity and high dispersion, with the lowest separability and coherence noted for Coastal Flat. The mapping of the coastal environments obtained Kappa coefficients between 0.46 and 0.51, indicating the shallow incidence angles during the dry season as more appropriated for the study. The interferometric and radargrammetric DSMs were elaborated in multi-pass and single revisit with commitment between incidence angles, spatial baseline and temporal decorrelation. A vertical accuracy assessment was performed with paired statistical tests at surveyed elevations in the field that resulted in discrepancies, bias and precision, in accordance to the Brazilian Cartographic Accuracy Standard for Digital Cartographic Products (PEC-PCD), in addition, the DSMs were compared throughout Taylor and Target diagrams. The interferometric DSMs achieved RMSE between 9.57 and 25.18 m, with better performance for the DSM CSK, acquired with 1 day of revisit, steeper incidence, in rainy season and compatible at a scale of 1: 50,000, class A. However, the interferometric approach was not able to solve the three-dimensional reconstruction in incoherent environments. The radargrammetric models of SARscape and Toutin achieved a RMSE between 4.34 and 7.76, and the best performances were for the Toutin's models compatible at a scale of 1: 50,000, class A. The advantage of radargrammetry was to provide continuous three-dimensional reconstruction, including the Coastal Flat of incoherent behavior. The comparison of the DSMs through the Taylor and Target diagrams showed fluctuations of precision between CSK and TSX systems and their respective acquisition conditions and models, but it is remarkable the stability of the lowest variability and the correlation well fitted for the DSMs given by TSX system, shallow incidences, dry season and Toutin model. The Coastal Plateau and Fluvial Marine Terrace had the lowest vertical error between 3.89 and 28.59 m, and between 3.79 and 20.33 m, respectively. On the contrary, the Coastal Flat had the highest RMSE between 4.16 and 26.24 m. The Coastal Plateau was the most suitable coastal environment to estimate the height following the Taylor and Target diagrams, with the plotted positions close to the field references. The CSK and TSX data allowed to map the ZCA precisely, based on X-band perspective, high spatial resolution and revisit, which has demonstrated the support for detailed cartography of spatial scale (1: 50,000) and frequent updating (semiannual up to annual).

Keywords: Synthetic Aperture Radar, Interferometry, Radargrammetry, Amazon Coastal Environments.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PRECISÃO VERTICAL DOS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO DE COBERTURA GLOBAL DISCRIMINADOS POR TIPO DE ELABORAÇÃO, PRECISÃO VERTICAL E RESOLUÇÃO NO TERRENO (INDICADO POR CÍRCULO EM METROS).	24
FIGURA 2 - CONCENTRAÇÃO ESPACIAL DAS PESQUISAS DO INPE DESENVOLVIDAS COM AS TÉCNICAS SAR DE RADARGRAMETRIA, INTERFEROMETRIA E POLARIMETRIA.....	27
FIGURA 3 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ZCA E OS RESPECTIVOS SETORES COSTEIROS ABORDADOS EM ZAMBONI E NICOLODI (2008): AMAZÔNICO (AM), ATLÂNTICO (AT), INSULAR ESTUARINO (IE), CONTINENTAL ESTUARINO (CE), COSTA ATLÂNTICA DO SALGADO PARAENSE (CAP), GOLFÃO MARANHENSE (GM), LITORAL OCIDENTAL (LO) E BAIXADA MARANHENSE (BM).	34
FIGURA 4 - PRINCIPAIS ELEMENTOS DA GEOMETRIA DE AQUISIÇÃO QUE COMPÕE A COMBINAÇÃO DE SINAIS NO INTERVALO DE ABERTURA SINTÉTICA DO RADAR.	39
FIGURA 5 - ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO NA FAIXA DE MICROONDAS.	39
FIGURA 6 - SÍNTESE DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS DO RADAR IMAGEADOR MONOESTÁTICO.....	41
FIGURA 7 - GEOMETRIA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS SAR	43
FIGURA 8 - DISPOSIÇÃO DO PRINCIPAIS ÂNGULOS PARA AQUISIÇÃO DE IMAGENS DE RADAR	44
FIGURA 9 - COMPRESSÃO DAS CÉLULAS DE RESOLUÇÃO NO SENTIDO PRÓXIMO A ANTENA.	47
FIGURA 10 - DESLOCAMENTO DA PROJEÇÃO DO RELEVO NA CONDIÇÃO DE ENCURTAMENTO DE VERTENTE (DECLIVIDADE $\leq \theta_i$).	48
FIGURA 11 - INFLUÊNCIA DO RELEVO ACIDENTADO NA MODULAÇÃO DO COEFICIENTE DE RETROESPALHAMENTO.	48
FIGURA 12 - DESLOCAMENTO DA PROJEÇÃO DO RELEVO NA CONDIÇÃO DE INVERSÃO DO RELEVO (DECLIVIDADE $> \theta_i$).	49
FIGURA 13 - OCORRÊNCIA DE SOMBREAMENTO NA GEOMETRIA DE ALCANCE INCLINADO OBSERVADA A VERTENTE OPOSTA A ILUMINAÇÃO (DECLIVIDADE DA VERTENTE DORSAL $< \beta$).	50
FIGURA 14 - MODOS FUNDAMENTAIS DE AQUISIÇÃO DE PARES INTERFEROMÉTRICOS EM PASSAGEM ÚNICA E PASSAGEM MÚLTIPLA COM CONFIGURAÇÃO CRUZADA E AO LONGO DO TRAJETO.	57
FIGURA 15 - PRINCIPAIS ELEMENTOS DA GEOMETRIA DE AQUISIÇÃO INTERFEROMÉTRICA EM UMA CONFIGURAÇÃO CRUZADA A TRAJETÓRIA. É ILUSTRADA A CONDIÇÃO DE INTERFERÊNCIA EM SINAIS DE MESMA FASE.....	58
FIGURA 16 - REPRESENTAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DE LEBERL (1990).	64
FIGURA 17 - GEOMETRIA DE AQUISIÇÃO DE ESTÉREOS PARES RADARGRAMÉTRICOS EM VISADA DE SENTIDOS OPOSTOS.....	66
FIGURA 18 - GEOMETRIA DE AQUISIÇÃO DE ESTÉREOS PARES RADARGRAMÉTRICOS EM VISADA DE MESMO SENTIDO.	67
FIGURA 19 - DISPOSIÇÃO DE PONTOS PARA AVALIAÇÃO DE ACURÁCIA POSICIONAL SEGUNDO ASPRS (1990).	70
FIGURA 20 - QUADRÍCULAS DO MODIS UTILIZADAS PARA COBRIR A ZCA NA ARTICULAÇÃO SINUSOIDAL.	75
FIGURA 21 - A) ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA COM OS PRINCIPAIS COMPARTIMENTOS COSTEIROS E AS UNIDADES DE RELEVO BÁSICAS. B) ÁREA EXPERIMENTAL FORMADA PELA INTERSEÇÃO	

DOS PARES INTERFEROMÉTRICOS CSK E TSX. C) ÁREA EXPERIMENTAL FORMADA PELA INTERSEÇÃO DOS PARES RADARGRAMÉTRICOS CSK E TSX.	77
FIGURA 22 - MAPA DOS AMBIENTES COSTEIROS AMAZÔNICOS MOSTRANDO A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS MEDIÇÕES GNSS E RESPECTIVAS REPRESENTAÇÕES PARA COM AS IMAGENS CSK E TSX, IMAGENS ÓPTICAS DO GOOGLE EARTH E IMAGENS TOMADAS NO CAMPO.	80
FIGURA 23 - FLUXOGRAMA DAS PRINCIPAIS ETAPAS DO ESTUDO.	81
FIGURA 24 - A) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO I COM ZCA NO TERRITÓRIO BRASILEIRO; B) REGIÕES DA COSTA NORTE E PRINCIPAIS UNIDADES DE RELEVO; C) SETORES COSTEIROS LOCALIZADOS NA ZCA.	82
FIGURA 25 - DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS USADOS PARA MAPEAR AS VARIAÇÕES DE LINHA DE COSTA NA ZCA.	83
FIGURA 26 - EXEMPLO DE IMAGEM MODIS DO ANO DE 2014 COM OS PRINCIPAIS ÍNDICES ESPECTRAIS UTILIZADOS PARA DELINEAR A LINHA DE COSTA.	90
FIGURA 27 - CURVAS ESPECTRAIS MOSTRANDO O COMPORTAMENTO DAS FEIÇÕES DE MUDANÇAS COSTEIRAS.	91
FIGURA 28 - BALANÇO SEDIMENTAR NA ZCA COM UM PICO DE DEPOSIÇÃO SEDIMENTAR ENTRE 2004 E 2005 DURANTE UM PERÍODO DE SECA, EM ADIÇÃO, A TENDÊNCIA LINEAR LIGEIRAMENTE EROSIVA.	92
FIGURA 29 - VARIAÇÕES DE LINHA DE COSTA MAPEADAS NA ZCA PARA FEIÇÕES DE ACRESÇAO E EROSAO, ALÉM DISSO, É MOSTRADA A DENSIDADE DE VARIAÇÕES DE LINHA DE COSTA COM ISOLINHAS.	93
FIGURA 30 - A) LOCALIZAÇÃO DA ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA; B) COMPARTIMENTOS DA COSTA AMAZÔNICA COM UNIDADES DE RELEVO; C) LOCALIZAÇÃO DAS CENAS SAR UTILIZADAS NO EXPERIMENTO II.	97
FIGURA 31 - DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS USADOS PARA O MAPEAMENTO DE AMBIENTES COSTEIROS.	98
FIGURA 32 - CARACTERIZAÇÃO DOS AMBIENTES COSTEIROS AMAZÔNICOS MAPEADOS NAS CONDIÇÕES DE ESTAÇÃO CHUVOSA E SECA PARA ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA ÍNGREME ($\theta < 35^\circ$) E RASANTE ($\theta \geq 35^\circ$). OS ELEMENTOS (A), (E), (I) E (M) DESCREVEM O ATRIBUTO PRIMÁRIO DE COEFICIENTE DE RETROESPALHAMENTO EM ESCALA LOGARÍTMICA DE DECIBÉIS (DB). OS ELEMENTOS (B), (F), (J) E (N) DESCREVEM O COEFICIENTE DE VARIAÇÃO EM UNIDADE ADIMENSIONAL NO INTERVALO DE [0; 1]. OS ELEMENTOS (C), (G), (K) E (O) DESCREVEM A TEXTURA MÉDIA OBSERVADA EM TODAS AS DIREÇÕES COM UNIDADE ADIMENSIONAL. OS ELEMENTOS (D), (H), (L) E (P) DESCREVEM O ÍNDICE DE FORMA RELACIONADO AO MÍNIMO OBJETO SEGMENTADO EM UNIDADE ADIMENSIONAL.	107
FIGURA 33 - CARACTERIZAÇÃO DO COEFICIENTE DE RETROESPALHAMENTO POR AMBIENTES COSTEIROS PARA COM AS OBSERVAÇÕES DOS PONTOS DE CAMPO. AS AQUISIÇÕES DO TSX ÍNGREME SECO, CSK ÍNGREME CHUVOSO, TSX RASANTE CHUVOSO E CSK RASANTE SECO CORRESPONDEM RESPECTIVAMENTE AOS ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA (θ) DE $23,95^\circ$, $32,2^\circ$, $44,46^\circ$ E $58,51^\circ$	109
FIGURA 34 - MAPA DE AMBIENTES COSTEIROS A PARTIR DOS DADOS CSK E TSX: A) CSK ADQUIRIDO EM 07/04/2016 E ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE $32,2^\circ$; B) TSX ADQUIRIDO EM 25/03/2016 E ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE $44,46^\circ$; C) TSX ADQUIRIDO EM 16/11/2016 E ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE $23,95^\circ$; E D) CSK ADQUIRIDO EM 31/10/2016 E ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE $58,51^\circ$	110
FIGURA 35 - MAPA DE DETECÇÃO DE MUDANÇAS PARA OS AMBIENTES COSTEIROS DE PLANÍCIE COSTEIRA (PC), TABULEIRO COSTEIRO (TC), TERRAÇO FLUVIOMARINHO (TFM) E	

HIDROGRAFIA (Hi), OBSERVADOS OS CONJUNTOS DE IMAGENS CSK E TSX NO PERÍODO ENTRE MARÇO E NOVEMBRO DE 2016.....	112
FIGURA 36 - A) LOCALIZAÇÃO DA ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA; B) COMPARTIMENTOS DA COSTA AMAZÔNICA COM UNIDADES DE RELEVO; C) LOCALIZAÇÃO DAS CENAS SAR UTILIZADAS NO EXPERIMENTO III.....	118
FIGURA 37 - DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS USADOS PARA ELABORAÇÃO DE MDSS POR INTERFEROMETRIA SAR.....	119
FIGURA 38 - GEOMETRIA DE AQUISIÇÃO SAR INTERFEROMÉTRICA PARA OS TRATAMENTOS NO PERÍODO CHUVOSO E SECO E INCIDÊNCIA ÍNGREME ($\theta < 35^\circ$) E RASANTE ($\theta \geq 35^\circ$).....	121
FIGURA 39 - CENAS CSK E TSX CONJUGADAS NO PROCESSO DE CO-REGISTRO, E , OS GCPs COLETADOS EM VERMELHO PARA RESPOSTAS DE ALTA COERÊNCIA INTERFEROMÉTRICA.	129
FIGURA 40 - ESPACIALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO COM OS PRODUTOS DE INTERFEROGRAMA EM FASE PLANA E COERÊNCIA INTERFEROMÉTRICA NO QUAL AS LETRAS A), B), C) E D) CORRESPONDEM AOS PARES INTERFEROMÉTRICOS TSX RASANTE-CHUVOSO, CSK ÍNGREME-CHUVOSO, CSK RASANTE-SECO E TSX ÍNGREME-SECO, RESPECTIVAMENTE, EM ADIÇÃO, OS EXEMPLOS DAS ÁREAS DE PC, TC E TFM.	131
FIGURA 41 - CARACTERIZAÇÃO DA COERÊNCIA INTERFEROMÉTRICA POR AMBIENTES COSTEIROS PARA COM AS OBSERVAÇÕES DOS PONTOS DE CAMPO. É NOTÓRIO QUE A INFORMAÇÃO DE COERÊNCIA INTERFEROMÉTRICA PODE CONTRIBUIR NA DISCRIMINAÇÃO DOS AMBIENTES COSTEIROS.....	132
FIGURA 42 - CARACTERÍSTICAS DA COERÊNCIA ESTIMADA E OBSERVADA PARA OS PARES INTERFEROMÉTRICOS UTILIZADOS PARA MAPEAR OS AMBIENTES COSTEIROS AMAZÔNICOS.	134
FIGURA 43 - MDSS INTERFEROMÉTRICOS ELABORADOS A PARTIR DE DADOS SAR CSK E TSX ADQUIRIDOS EM INCIDÊNCIAS ÍNGREME ($\theta < 35^\circ$) E RASANTE ($\theta \geq 35^\circ$), DURANTE O PERÍODO CHUVOSO E SECO.....	137
FIGURA 44 - DIAGRAMAS DE TAYLOR E ALVO GERADOS PARA ALOCAR OS MDSS INTERFEROMÉTRICOS SEGUNDO OS ERROS VERTICAIS EM RELAÇÃO AS OBSERVAÇÕES DE REFERÊNCIA GNSS LEVANTADAS EM CAMPO.....	138
FIGURA 45 - CARACTERÍSTICAS DO ERRO VERTICAL EM DISCREPÂNCIA (BOX PLOT) E RMSE (LINHA TRACEJADA) POR AMBIENTE COSTEIRO A PARTIR DOS MDSS INTERFEROMÉTRICOS ELABORADOS SOB INCIDÊNCIA ÍNGREME ($\theta < 35^\circ$) E RASANTE ($\theta \geq 35^\circ$), DURANTE O PERÍODO CHUVOSO E SECO.	139
FIGURA 46 - CARACTERIZAÇÃO DOS AMBIENTES COSTEIROS AMAZÔNICOS PARA O COMPORTAMENTO DA COERÊNCIA EM DIFERENTES COMPOSIÇÕES DE TEMPO DE REVISITA INTERFEROMÉTRICA DURANTE AS ESTAÇÕES CHUVOSA E SECA.	140
FIGURA 47 - MAPA DE ISOLINHAS COM ERROS VERTICAIS DOS MDSS INTERFEROMÉTRICOS.	141
FIGURA 48 - DIAGRAMAS DE TAYLOR E ALVO PARA OS AMBIENTES COSTEIROS AMAZÔNICOS ALOCANDO POSIÇÕES SEGUNDO OS PARÂMETROS DE ERRO VERTICAIS DOS MDSS INTERFEROMÉTRICOS PARA COM A REFERÊNCIA DE OBSERVAÇÕES GNSS EM CAMPO.	143
FIGURA 49 - A) LOCALIZAÇÃO DA ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA; B) COMPARTIMENTOS DA COSTA AMAZÔNICA COM UNIDADES DE RELEVO; C) LOCALIZAÇÃO DAS CENAS SAR UTILIZADAS NO EXPERIMENTO III.....	146
FIGURA 50 - DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS USADOS PARA APLICAR MODELOS RADARGRAMÉTRICOS NA ZCA.....	147

FIGURA 51 - GEOMETRIA DE AQUISIÇÃO RADARGRAMÉTRICA EM MESMO SENTIDO PARA O CSK E TSX, ADQUIRIDOS ENTRE 2 E 7 DE ABRIL 2016 E 25 E 30 DE MARÇO DE 2016, RESPECTIVAMENTE.....	148
FIGURA 52 - MDSs RADARGRAMÉTRICOS PARA OS DADOS CSK E TSX ,OBTIDOS COM OS MODELOS RADARGRAMÉTRICOS DO SARscape E TOUTIN, E ORGANIZADOS POR NÚMERO DE SGCP.....	159
FIGURA 53 - DIAGRAMAS DE TAYLOR E ALVO GERADOS PARA ALOCAR OS MDSs RADARGRAMÉTRICOS SEGUNDO OS ERROS VERTICAIS PARA COM AS OBSERVAÇÕES GNSS DE REFERÊNCIA LEVANTADAS EM CAMPO.....	163
FIGURA 54 - CARACTERÍSTICAS DO ERRO VERTICAL EM DISCREPÂNCIA (BOX PLOT) E RMSE (LINHA TRACEJADA) POR AMBIENTE COSTEIRO A PARTIR DOS MDSs RADARGRAMÉTRICOS.	164
FIGURA 55 - CARACTERIZAÇÃO DA CORRELAÇÃO CRUZADA EM AMPLITUDE, RMSE VERTICAL E LINHA DE TENDÊNCIA EXPONENCIAL GERADO PARA OS AMBIENTES COSTEIROS AMAZÔNICOS COM PONTOS LEVANTADOS EM CAMPO.....	166
FIGURA 56 - GRÁFICO DE DISPERSÃO PARA AS ALTURAS ESTIMADAS (<i>Zest</i>) E MEDIDAS (<i>Zmed</i>) COM ESFERAS PROPORCIONAIS AO RMSE OBTIDO NA AVALIAÇÃO DE ACURÁCIA VERTICAL DOS MDSs RADARGRAMÉTRICOS.....	167
FIGURA 57 - MAPAS DE ISOLINHA DE ERRO RETORNANDO O PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS VERTICAIS POR MDS RADARGRAMÉTRICO.....	168
FIGURA 58 - DIAGRAMAS DE TAYLOR E ALVO PARA OS AMBIENTES COSTEIROS AMAZÔNICOS ALOCANDO POSIÇÕES SEGUNDO OS PARÂMETROS DE ERRO VERTICAIS NOS MDSs RADARGRAMÉTRICOS PARA COM A REFERÊNCIA DE OBSERVAÇÕES GNSS EM CAMPO.	170

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - LIMIARES DE COERÊNCIA INTERFEROMÉTRICA PARA APLICAÇÃO CARTOGRÁFICA. .	61
TABELA 2 - ACURÁCIA VERTICAL DE MDSs OBTIDOS POR DIFERENTES TÉCNICAS.	68
TABELA 3 - PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICO PARA PRODUTOS CARTOGRÁFICOS DIGITAIS (PEC-PCD).....	72
TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS DADOS UTILIZADOS NO ESTUDO E NÚMERO DE ELEMENTOS AMOSTRAIS LEVANTADOS EM CAMPO.	73
TABELA 5 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO SENSOR MODIS PRODUTO MOD09.	74
TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS ORBITAIS CSK E TSX.....	75
TABELA 7 - CARACTERÍSTICAS DOS PARES INTERFEROMÉTRICOS E AS PRINCIPAIS VARIÁVEIS FÍSICAS.	78
TABELA 8 - CARACTERÍSTICAS DOS PARES RADARGRAMÉTRICOS E AS PRINCIPAIS VARIÁVEIS FÍSICAS.	78
TABELA 9 - CARACTERÍSTICAS RELACIONADAS AOS DADOS MODIS.	84
TABELA 10 - PROCESSOS E REGRAS DE CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETO USADAS PARA MAPEAR FEIÇÕES DE LINHA DE COSTA NA ZCA.	86
TABELA 11 - TESTES ESTATÍSTICOS PARA DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICANTE DA MÉDIA E VARIÂNCIA DAS MUDANÇAS COSTEIRAS TOTAIS (MCT).	94
TABELA 12 - MATRIZ DE CONFUSÃO ELABORADA PARA O MAPEAMENTO DE VARIAÇÕES DE LINHA DE COSTA NA ZCA.....	95
TABELA 13 - PROCESSOS E REGRAS DE CLASSIFICAÇÃO PARA O MAPEAMENTO DOS AMBIENTES COSTEIRO AMAZÔNICOS.....	101
TABELA 14 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DOS PRODUTOS CSK E TSX, OBTIDOS NO PROCESSAMENTO SAR EM AMPLITUDE.	103
TABELA 15 - CHAVE DE INTERPRETAÇÃO PARA RECONHECER OS AMBIENTES COSTEIRO AMAZÔNICOS COM IMAGENS CSK E TSX, E RESPECTIVAS AQUISIÇÕES NO PERÍODO SECO E CHUVOSO SOB INCIDÊNCIA ÍNGREME E RASANTE.	105
TABELA 16 - MATRIZ DE MUDANÇAS PARA OS MAPEAMENTOS DE AMBIENTES COSTEIRO AMAZÔNICOS EM ESTÁGIO INICIAL CHUVOSO E ESTÁGIO FINAL SECO, UTILIZANDO OS CONJUNTOS DE DADOS CSK E TSX.	111
TABELA 17 - MATRIZ DE SEPARABILIDADE A PARTIR DAS INFORMAÇÕES DE σ^0 , CV E TEXTURA EXTRAÍDAS PARA OS 165 ICPS COLETADOS NOS AMBIENTES COSTEIRO AMAZÔNICOS....	114
TABELA 18 - MATRIZ DE CONFUSÃO PARA O MAPEAMENTO DE AMBIENTES COSTEIRO UTILIZANDO OS DADOS CSK E TSX SOB AS CONDIÇÕES DE ESTAÇÃO CHUVOSA E SECA PARA ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA DE CARÁTER ÍNGREME ($\theta < 35^\circ$) E RASANTE ($\theta \geq 35^\circ$).	115
TABELA 19 - PARÂMETROS ESTIMADOS PARA A LINHA DE BASE ESPACIAL DOS PARES INTERFEROMÉTRICA FORNECIDOS COM SISTEMAS SAR CSK E TSX.	128
TABELA 20 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DOS PRODUTOS INTERFEROMÉTRICOS PROVENIENTES DOS CONJUNTOS DE DADOS CSK E TSX.	130
TABELA 21 - ESTATÍSTICAS DE ACURÁCIA VERTICAL PARA OS MDSs INTERFEROMÉTRICOS BASEADA NA DISCREPÂNCIA DOS ERROS, RMSE E LE90.	133
TABELA 22 - TESTES ESTATÍSTICOS PARA SE OBTER A ESCALA CARTOGRÁFICA SEGUNDOS OS REQUISITOS DO PEC-PCD PARA COM OS MDSs INTERFEROMÉTRICOS.	135
TABELA 23 - PARÂMETROS DE GEOMETRIA DE AQUISIÇÃO SAR DEFINIDOS PARA A ESTEREOSCOPIA DAS CENAS CSK E TSX SELECIONADAS.	155

TABELA 24 -ACURÁCIA VERTICAL PARA MDSs RADARGRAMÉTRICOS BASEADO EM DISCREPÂNCIAS, RMSE E LE90.	156
TABELA 25 - TESTES ESTATÍSTICOS PARA SE OBTER A ESCALA CARTOGRÁFICA SEGUNDOS OS REQUISITOS DO PEC-PCD PARA COM OS MDSs RADARGRAMÉTRICOS.	160

LISTA DE SIGLAS

Am	Setor Costeiro Amazônico
At	Setor Costeiro Atlântico
AW3D	Advanced Land Observing Satellite World 3D
ASTER GDEM	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model
ASI	Agência Espacial Italiana
BM	Setor Costeiro Baixada Maranhense
BS	Balanço Sedimentar
BSI	Bare Soil Index
CAP	Setor Costeiro Costa Atlântica do Salgado Paraense
CE	Setor Costeiro Continental Estuarino
CSK	Como-Skymed
CV	Coefficiente de Variação
DLR	Centro Aeroespacial Alemão
DT	Divergência Transformada
GCP	Ground Control Point
GLCM	Gray-Level Co-occurrence Matrix
GM	Setor Costeiro Golfão Maranhense
GMTED	Global Multi-resolution Terrain Elevation Data
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GTOPO30	Global 30 Arc-Second Elevation
Hi	Hidrografia
ICP	Independent Check Point
IE	Setor Costeiro Insular Estuarino
IF	Índice de Forma
InSAR	Interferometria SAR
JM	Jeffries-Matusita
LIDAR	Light Detection And Ranging
LO	Litoral Ocidental
MCT	Mudanças Costeiras Totais
MDE	Modelos Digitais de Elevação
MDS	Modelos Digitais de Superfície
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NDWI _e	Enhanced Normalized Difference Water Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NEL	Número Equivalente de Looks
NIR	Infravermelho Próximo
NSSDA	National Standard for Spatial Data Accuracy
OLI	Operational Land Imager
OBIA	Object-Based Image Analysis
PC	Planície Costeira
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfico
PEC-PCD	Padrão de Exatidão Cartográfico para Produtos Cartográficos Digitais
PolSAR	Polarimetria SAR
RMSE	Root Mean Square Error

SPOTDEM	Satellite Pour l'Observation de la Terre Digital Elevation Model
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SGCP	Stereo Ground Control Points
SLC	Single Look Complex
SRTM	Shuttle Radar Topographic Mission
SAR	Synthetic Aperture Radar
TC	Tabuleiro Costeiro
TFM	Terraço Fluviomarinho
TanDEM-X	TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement
TSX	TerraSAR-X
VIS	Visível
ZCA	Zona Costeira Amazônica
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
1.1 Caracterização do Problema	21
1.2 Estado da Arte e Contribuição	23
1.3 Hipótese e Objetivos	31
1.4 Estrutura da Tese	32
2. ÁREA DE ESTUDO	33
2.1 Clima e Circulação Atmosférica	34
2.2 Cobertura Vegetal	35
2.3 Geologia e Geomorfologia	36
3. REFERENCIAIS TEÓRICOS	38
3.1 Radar de Abertura Sintética	38
3.2 Interferometria SAR	51
3.3 Radargrametria	62
3.4 Acurácia Vertical	68
4. MATERIAIS E MÉTODOS	73
4.1 Materiais	73
4.1.1 Imagens Ópticas	74
4.1.2 Dados SAR	75
4.1.3 Dados Levantados em Campo	79
4.2 Desenvolvimento Metodológico Geral	81
5. EXPERIMENTOS	82
5.1 Variações de Linha de Costa	82
5.1.1 Objetivo	82
5.1.2 Área de Estudo	82
5.1.3 Método.....	83
5.1.3.1 Tratamento e Agrupamento	83
5.1.3.2 Mapeamento de Linha de Costa	85
5.1.3.3 Análises Estatísticas e Acurácia Temática	87
5.1.4 Resultados e Discussões	90
5.1.4.1 Caracterização Espectral e Balanço Sedimentar.....	90
5.1.4.2 Diferenças Estatísticas e Avaliação Temática	93
5.1.5 Conclusões.....	96
5.2 Mapeamento de Ambientes Costeiros	97

5.2.1	Objetivo.....	97
5.2.2	Área de Estudo	97
5.2.3	Método.....	98
5.2.3.1	Cadeia de Processamento em Amplitude	99
5.2.3.2	Classificação de Ambientes Costeiros.....	100
5.2.3.3	Detecção de Mudanças e Acurácia Temática	101
5.2.4	Resultados e Discussões.....	103
5.2.4.1	Cadeia SAR em Amplitude	103
5.2.4.2	Caracterização Espectral e Mapeamento de Ambientes Costeiros	104
5.2.4.3	Detecção de Mudanças	111
5.2.4.4	Acurácia Temática do Mapeamento de Ambientes Costeiros	113
5.2.5	Conclusões.....	116
5.3	Elaboração de MDS por Interferometria SAR	118
5.3.1	Objetivo.....	118
5.3.2	Área de Estudo	118
5.3.3	Método.....	119
5.3.3.1	Geometria de Aquisição SAR.....	120
5.3.3.2	Cadeia de Processamento Interferométrico	121
5.3.3.3	Acurácia Vertical.....	123
5.3.4	Resultados e Discussões.....	128
5.3.4.1	Cadeia Interferométrica	128
5.3.4.2	Acurácia Vertical dos MDSs Interferométricos	132
5.3.4.3	Acurácia Vertical dos Ambientes Costeiros	139
5.3.5	Conclusões.....	144
5.4	Elaboração de MDS por Radargrametria	146
5.4.1	Objetivos	146
5.4.2	Área de Estudo	146
5.4.3	Método.....	147
5.4.3.1	Geometria de Aquisição SAR.....	148
5.4.3.2	Modelos Radargramétricos.....	149
5.4.3.3	Acurácia Vertical.....	153
5.4.4	Resultados e Discussões.....	155
5.4.4.1	Estereoscopia SAR	155
5.4.4.2	Acurácia Vertical dos MDSs Radargramétricos.....	156
5.4.4.3	Acurácia Vertical dos Ambientes Costeiros	164
5.4.5	Conclusões.....	171

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	173
6.1 Conclusões	173
6.2 Recomendações	175
REFERÊNCIAS	176

1. INTRODUÇÃO

1.1 Caracterização do Problema

A Zona Costeira Amazônica (ZCA) tem o rio Amazonas como o principal contribuinte de água doce e sedimentos, o que torna o ambiente costeiro totalmente atípico, constituído por um complexo estuário delta, de fato, isto é devido ao equilíbrio entre um vale afogado durante o Quaternário junto a gigantesca descarga de sedimentos (MEADE et al., 1985; NITTROUER et al., 1986). A desembocadura do rio Amazonas propicia vazões na ordem de 6,3 trilhões de $\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ e o segundo maior aporte sedimentar do mundo com 1,2 bilhões de $\text{ton} \cdot \text{ano}^{-1}$, ao qual acrescentam-se as contribuições dos demais rios que deságuam nos estados do Amapá, Pará e Maranhão adicionando 30 $\text{ton} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ de aporte sedimentar à planície costeira e à plataforma continental (GEYER et al., 1996; KJERFVE et al., 2002; MEADE et al., 1985; PEREIRA et al., 2012; SOUZA-FILHO et al., 2005).

A costa amazônica é descrita como tropical úmida de alta precipitação, dominada por macromarés semidiurnas, ampla plataforma continental, propiciando formar planícies extensas inundadas periodicamente e planaltos rebaixados suportadas por rochas sedimentares mais antigas (COSTA et al., 1996; EL-ROBRINI et al., 2006). A ZCA se estende ao longo da linha de costa sob influência da pluma de sedimentos do rio Amazonas. Especificamente no Brasil, há cerca de 1.200 km de litoral em linha reta e a população estimada está em aproximadamente 5,71 milhões de pessoas correspondendo a 2,67% da população do Brasil, com uma densidade de 35,18 $\text{hab} \cdot \text{km}^{-2}$ (IBGE, 2010; ZAMBONI; NICOLODI, 2008). Essas condições físico-ambientais tornam a ZCA singular e complexa às mudanças morfológicas o que demanda intervenções gerenciais que vão desde a cartografia sistemática em escala regional a local até a consolidação de políticas públicas de ordenamento territorial.

Para mapear ambientes costeiros tropicais úmidos, é imperativo obter Modelos Digitais de Superfície (MDS). Dados adquiridos no espectro de microondas devem ser priorizados em detrimento de dados ópticos, devido não apenas à morfometria da paisagem, mas principalmente às condições de nebulosidade (NAPIERALSKI et al., 2013; WANG, 2010). Sistemas sensores de radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar-SAR*) se caracterizam como sistemas coerentes os quais realizam medições em direção e alcance com previsibilidade, por decorrência, há melhoria na resolução espacial em função da síntese de uma antena virtual baseada em princípios de interferência e na cadência de feixes sob efeito *Doppler* (WOODHOUSE, 2006). De acordo com Henderson e Lewis (1998), sistemas SAR medem

propriedades eletrogeométricas dos alvos com penetrabilidade, sensibilidade ao relevo, capacidade de operação diurna e noturna, menos efeito da atmosfera, geometria de aquisição controlada, alta amostragem espacial e revisita. O MDS representa a superfície por amostras de elevação do terreno para um trio de coordenadas que considera o topo da cobertura terrestre, vegetação e estruturas artificiais (MAUNE, 2007). No processo de mapeamento cartográfico, um MDS preciso deve fornecer fonte confiável de informações sobre o terreno aplicáveis em topografia, identificação de substrato geológico ou geomorfológico, hidrologia, susceptibilidade à erosão, movimento de massa, inundação e assim por diante, este com definição direta da incerteza medida na elevação.

Recentemente, as principais técnicas para elaborar MDS em conjuntos de dados SAR são a radargrametria e a interferometria (CROSETTO; PÉREZ, 2000; TOUTIN; GRAY, 2000). A radargrametria é a técnica capaz de extrair informações geométricas sobre um alvo iluminado por um radar ao projetar a interseção de círculos Doppler advindos de par estéreo (LEBERL, 1990). A interferometria refere-se a medição acurada de distâncias relativas entre duas ou mais ondas as quais se interferem em condição de previsibilidade com base na propriedade coerente da radiação de microondas, desta forma, combina-se sinais complexos provenientes de antenas ligadas por linha de base consistente em diferentes posições e/ou instantes no tempo (PARADELLA et al., 2012; WOODHOUSE, 2006).

A reconstrução tridimensional da superfície tem como fontes de erro: i) parâmetros do sistema SAR, representados pelo comprimento de onda, resolução espacial, radiometria, geometria de aquisição, *speckle*, precisão das órbitas e cadeia de processamento; ii) decorrelação temporal em que o sinal complexo do radar deve alcançar coerência suficiente entre o tempo de revisita; iii) linha de base espacial, controla a resolução vertical e o limiar crítico entre sinal e ruído; iv) modelos de reconstrução da superfície, utiliza-se da amplitude e/ou fase nos procedimentos intrínsecos de co-registro, correspondência, interferograma, desdobramento e conversão do deslocamento em altura; e, iv) as características físicas da paisagem como propriedades eletrogeométricas, constante dielétrica, meteorologia, cobertura da terra, declividade e rugosidade (FAYARD et al., 2007; FERRETTI et al., 2007; HANSSEN, 2002; MÉRIC et al., 2009). A acurácia posicional das abordagens por interferometria e radargrametria tem performance teórica majoritariamente controlada pelos compromissos dos pares interferométricos e estereoscópicos para com a coerência, correspondência radiométrica e os ângulo de incidência (FERRETTI et al., 2007; FERRETTI et al., 1999; TOUTIN, 2002, 2004).

O MDS e produtos derivados como declividade, aspecto, curvatura, rede de drenagem e índices topográficos são extremamente relevantes para aplicações em geociências no que se refere a extração de informação e análise do terreno. Por outro lado, os MDSs disponibilizados gratuitamente atendem escalas cartográficas no máximo até 1:100.000, sem atualização periódica (RODRÍGUEZ et al., 2006; TACHIKAWA et al., 2011). Estes MDSs limitam aplicações cartográficas precisas, particularmente em regiões de relevo baixo, plano, dinâmico e tropical úmido como a ZCA.

Os atuais programas espaciais de observação terrestre incorporam amostragem espacial e temporal diferenciada. Isso pelo fato das plataformas orbitais SAR tenderem a constituir constelações de menor massa, intervalo de revisita inferior a 15 dias, melhor resolução espacial no terreno entre 1-10 m, grande variedade de ângulos de incidências e amplas larguras de faixa (OUCHI, 2013; PARADELLA et al., 2012). Nesse contexto, é importante destacar a capacidade de mapeamento desses novos sistemas SAR configurados em constelações, sobretudo aplicados a ambientes de comportamento parcialmente coerente a incoerente, colaborando no delineamento entre a geometria de aquisição SAR e o meio físico de interesse.

Os desafios de mapeamento de ambientes costeiros tropicais úmidos estão na utilização de dados SAR multitemporais e multifrequência que permitam a extração de informação completa do sinal em amplitude e fase, e viabilizem a identificação e quantificação de alvos da superfície terrestre cada vez mais acurada com recorrente atualização. Em específico a costa amazônica, a disponibilidade de dados altimétricos limita-se para aplicações cartográficas precisas em função do relevo baixo e plano, vegetação densa, alta precipitação e a forte dinâmica costeira.

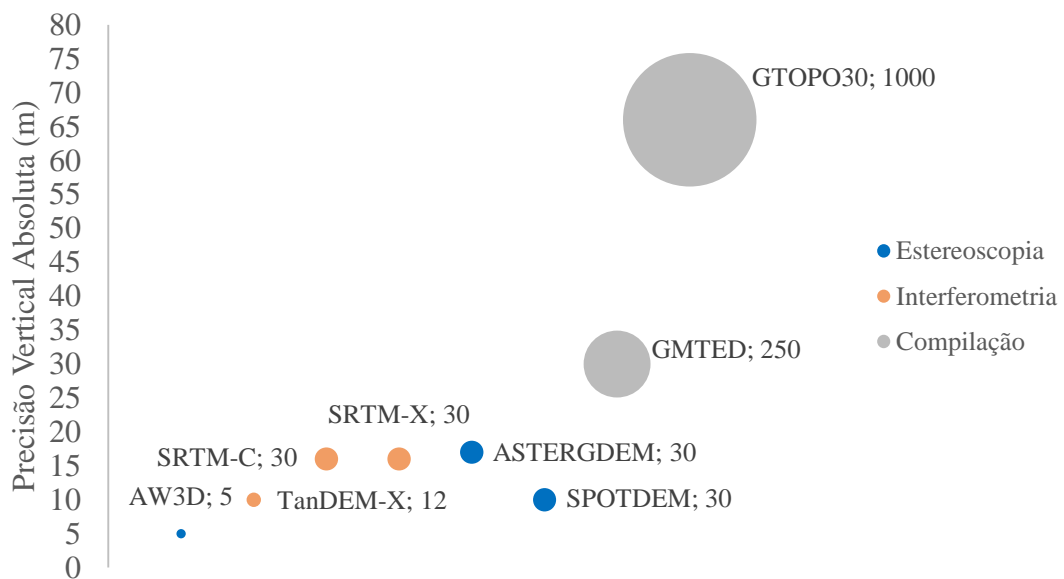
Desta forma, delinear diferentes cenários que recomendem a utilização apropriada das técnicas SAR, em específico, aquelas utilizadas para topografia, como radargrametria e interferometria, propiciam um novo patamar no processo de mapeamento dos ambientes costeiros amazônicos. Estudos comparativos sobre as abordagens para a geração de Modelos Digitais de Superfície (MDS) interferométricos e radargramétricos, sua aplicação e validação, deve indicar parâmetros do imageamento SAR mais adequados aos ambientes costeiros no complexo estuário delta da costa amazônica.

1.2 Estado da Arte e Contribuição

Iniciativas de agências espaciais internacionais têm disponibilizado MDE (Modelo Digital de Elevação) de cobertura global com contínuo avanço na acurácia e precisão

geométrica. Exemplos dessa disponibilidade estão nos MDEs *Global 30 Arc-Second Elevation* (GTOPO30), *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model* (ASTER GDEM), *Global Multi-resolution Terrain Elevation Data* (GMTED), *Satellite Pour l'Observation de la Terre Digital Elevation Model* (SPOTDEM), *Advanced Land Observing Satellite World 3D* (AW3D), *TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement* (TanDEM-X) como indica a Figura 1.

Figura 1 - Precisão vertical dos Modelos Digitais de Elevação de cobertura global discriminados por tipo de elaboração, precisão vertical e resolução no terreno (indicado por círculo em metros).



Fonte: AIRBUS (2016); DLR (2016); JAXA (2016); USGS (2016)

Estudos voltados a validação de MDEs apontam como principais fontes de erro as características dos dados primários, relacionados com: a geometria de aquisição, plataforma, sensor, a técnica de elaboração, condições ambientais e o tipo de superfície imageada. De fato, a qualidade geométrica dos MDEs está associado com a variabilidade geográfica do terreno mapeado e características como declividade e aspecto (MUKHERJEE et al., 2013).

Especificamente para MDS's gerados de dados SAR, os erros verticais apresentam um padrão espacial controlado por características do meio físico, propriedades eletrogeométricas dos alvos e conteúdo de água os quais alteram a razão sinal ruído do sensor (HANSSEN, 2002; TOUTIN; GRAY, 2000). Exemplos de padrão espacial no erro vertical estão nos estudos de Brautigam et al. (2014) e Rodríguez et al. (2006) que relataram a influência do ambiente de floresta tropical para a acurácia do MDE.

A interferometria e radargrametria têm a qualidade do produto final estritamente relacionada a determinação de parâmetros como: i) sistema sensor, observadas as características

de comprimento de onda, polarização, resolução espacial, geometria de aquisição, relação sinal-ruído, plataforma e processamento; ii) as características físicas da paisagem como propriedades eletrogeométricas, umidade, condições atmosféricas, textura e rugosidade; iii) relação entre feixe de radar, modo de imageamento e topografia, os quais determinam a combinação dos pares para atender compromissos radiométricos e geométricos por efeitos do relevo; iv) a defasagem temporal das cenas o que implica no grau de correlação do sinal complexo de radar; v) a linha de base espacial definida pela localização das observações para com as geometrias críticas de aquisição; e, vi) disponibilidade e acessibilidade para as imagens de radar em seus respectivos formatos e níveis de processamento (HENDERSON; LEWIS, 1998; MÉRIC et al., 2009; TOUTIN, 2002; WOODHOUSE, 2006; ZEBKER; VILLASENOR, 1992).

Dados SAR em modo de aquisição e domínios de resolução compatíveis, podem resultar produtos cartográficos com precisões diferentes, em função da abordagem adotada para a cadeia de processamento SAR. A interferometria utiliza a informação de fase na ordem do senoide da onda de microondas e a melhor detecção de célula do terreno no nível complexo da imagem. A consistência posicional é relacionada à coerência interferométrica de pares complexos conjugados ($|\gamma|$) e a determinação da linha de base com centenas de metros (HANSSEN, 2002). Já a radargrametria utiliza a informação em amplitude com perda na resolução da célula no terreno causada por processos de filtragem de ruído, sendo que a consistência posicional é baseada no ângulo de interseção dos pares estereoscópicos ($\Delta\theta$) com linha de base em centenas de quilômetros (LEBERL, 1998).

Reconstruções de superfície por técnicas radargramétricas tem menor precisão e resolução espacial comparadas a técnicas interferométricas. Contudo a geração de pares estereoscópicos em radar tem maior empregabilidade em aquisições de cenas com defasagem temporal, adversamente, pares interferométricos tem menor empregabilidade em paisagens de comportamento incoerente ao se utilizar séries temporais curtas ($2 \leq N^1 \leq 10$) (CROSETTO; PÉREZ, 2000).

Os recentes sistemas sensores SAR orbitais têm aprimorado a amostragem no terreno suportando resoluções de até 1 metro, o que garante acurácia à abordagem radargramétrica, em específico para áreas clássicas de descorrelação interferométrica como zonas úmidas, ambientes costeiros e florestas tropicais (CAPALDO, 2013; DE OLIVEIRA, 2011). O avanço na precisão vertical dos MDEs está relacionado às características das novas plataformas SAR orbitais disponíveis para uso civil.

¹ Número de imagens SAR da pilhagem (*stack*) em mesma órbita e ângulo de incidência.

A acurácia geométrica da informação gerada a partir de dados SAR tem sido estudada para as mais diversas condições e tipos de ambiente. Farr et al. (2007) detalharam a consistência geométrica dos dados SRTM de acesso mundial (banda C e espaçamento 3'') por continente e relataram que para a América do Sul, o erro horizontal absoluto foi de 9 metros e o erro vertical absoluto foi de 6,2 metros. Estes erros geométricos ficaram abaixo do esperado para a missão SRTM o que evidenciou o promissor emprego da técnica interferométrica de passagem única biestático.

Tachikawa et al. (2011) avaliaram a acurácia geométrica do ASTER GDEM de característica estereoscópica formado por pares no espectro do infravermelho próximo. Este MDE de cobertura global tem erro absoluto horizontal de 30 metros e erro absoluto vertical de 17 metros. As desvantagens do ASTERGDEM estão na presença de artefatos não topográficos e contaminação por nuvens.

Raggam et al. (2010) utilizaram imagens TerraSAR-X no modo Spotlight, com aquisições em trio de cenas ascendente e descendente. Neste estudo de caso, as áreas testes localizam-se na Áustria e foram constatados os maiores erros verticais em ambientes de floresta temperada, com árvores de altura em torno de 12 a 20 m.

Capaldo et al. (2015) realizaram uma comparação entre abordagens radargramétricas para a elaboração de MDSs com dados SAR de alta resolução (Spotlight e Ultrafine) provenientes dos sensores Cosmo-SkyMed, TerraSAR-X e Radarsat-2, aplicados para uma área teste no Canadá, caracterizada por relevo plano a ondulado e ambiente sde floresta temperada e urbano. Os autores obtiveram uma acurácia vertical em torno de 5 metros dos MDSs radargramétricos gerados, independente do sensor SAR utilizado e do modelo de orientação adotado.

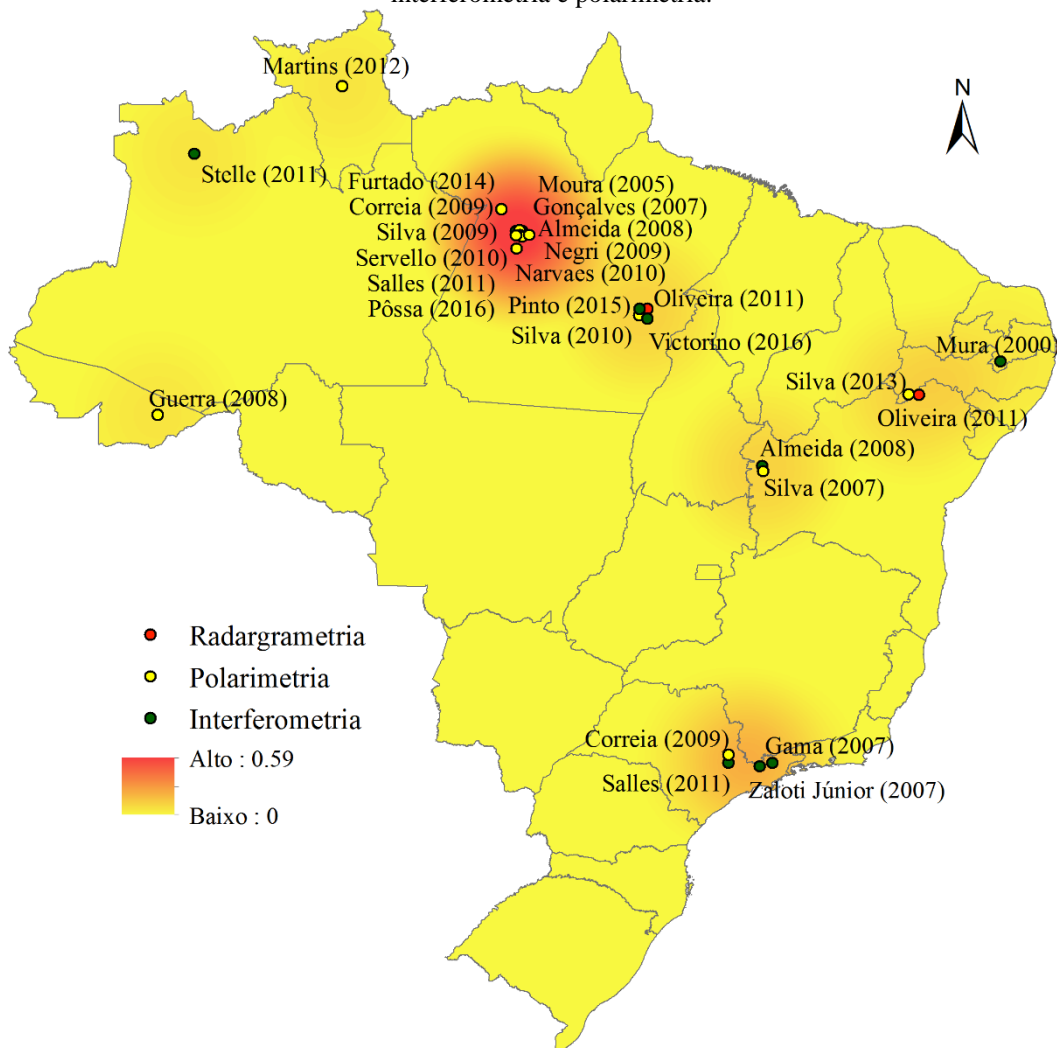
As recentes abordagens para interferometria estão voltadas para aplicações com múltiplas passagens entre espalhadores persistentes e espalhadores distribuídos (OSMANOĞLU et al., 2016; PARADELLA et al., 2012). Porém, a elaboração de MDS com interferometria de passagem múltipla com poucos pares ($N \leq 5$) tem sido investigada nos estudos de Zhang et al. (2016) e Osmanoglu et al. (2014), que estimaram interferogramas em fase plana e desdobrados para múltiplas linhas de base e múltiplas frequências baseados em filtro de Kalman, e, assim conseguiram produzir MDSs em áreas de baixa coerência, com RMSE de 15,6 m relativo ao ASTER GDEM e 9,7 m relativo ao *1/9 Arc-Second National Elevation Data*, respectivamente.

A análise de acurácia de MDSs elaborados para ambientes costeiros é ainda problemático, em função das características singulares e dinâmicas dessa paisagem. Coveney

et al., (2010) observaram que os erros de altimetria provenientes de LIDAR medidos no estuário de Shannon na costa da Irlanda eram significativamente maiores que a precisão informada pelos fornecedores do sensor, e, havia tendência de aumento do erro em direção a linha de costa, isto relacionado a rápida e frequente mudança morfológica da costa sob efeitos de ondas e marés.

No Brasil, os estudos com radar imageador tem avançado no emprego das técnicas SAR de vanguarda como radargrametria, polarimetria e interferometria o que amplia o entendimento dos métodos de microondas sob condições tropicais. Embora, a pesquisa e aplicação de métodos SAR deva contemplar toda diversidade paisagística no território brasileiro, observa-se uma concentração de estudos em florestas densas, caatinga e no sudeste brasileiro possivelmente vinculada a disponibilidade de dados e projetos específicos. De fato, existe um déficit em áreas costeiras e não florestais como indica a Figura 2.

Figura 2 - Concentração espacial das pesquisas do INPE desenvolvidas com as técnicas SAR de radargrametria, interferometria e polarimetria.



Os primeiros trabalhos no Brasil com uso de radares para cartografia são de Paradella et al. (2003, 2005a, 2005b) os quais avaliaram o potencial das imagens Radarsat-1 em ambiente florestal de relevo plano e montanhoso com RMSE entre 14,63 a 20,11 m para validação altimétrica. Pereira et al. (2014a) utilizaram radargrametria em um conjunto de dados Radarsat-1 modo Standard e alcançou um RMSE de 9,49 m, possibilitando o mapeamento na escala 1:100.000, classe A na costa amazônica. Oliveira (2011) realizou testes para MDSs com diferentes abordagens radargramétricas, oriundos de dados SAR orbitais e aplicados em ambientes tropicais de relevo montanhoso os quais demonstram consistência até uma escala de 1:50.000 classe A e RMSE em torno de 6 m. Oliveira et al. (2012) gerou cartas topográficas para o ambiente semiárido com avaliação planialtimétrica compatível 1:50.000 por meio de dados Radarsat-2 em modo *Ultrafine* e *Fine Quad-Pol*.

A Amazônia legal tem cerca 5,2 milhões de km² da qual em torno de 35% do território não possui mapeamentos em escalas maiores que 1:250.000, denominados de "vazios cartográficos". A razão para essa omissão está relacionada com as necessidades usuais das técnicas tradicionais de mapeamento topográfico, grande extensão territorial, difícil logística, condições climatológicas adversas e constituição densa da floresta tropical (CENSIPAM, 2016).

Para obter os mapeamentos sistemáticos e temáticos de áreas tropicais úmidas, com difícil acesso e forte dinâmica, como os ambientes costeiros amazônicos, caracterizados por intensos processos hidrodinâmicos de macromarés, ondas, correntes litorâneas e tempestades severas, deve-se considerar dados de sistemas sensores remotos aliados a levantamentos de campo e de informações colaterais pertinentes a múltiplas áreas do conhecimento, como geologia, geomorfologia, pedologia e uso e cobertura da terra. No caso das ilhas do baixo estuário do rio Amazonas, a ação é necessária e urgente, em função do escasso mapeamento de detalhe, do pequeno avanço no ordenamento territorial, despreparo para enfrentar danos provenientes do intenso adensamento urbano, falta de saneamento básico e degradação ambiental, além de processos erosivos continentais e costeiros, que tornam a situação do litoral amazônico ainda mais preocupante (PEREIRA et al., 2014b; SZLAFSTEIN, 2009).

Para abordar as questões relativas ao mapeamento da ZCA, diversos estudos têm utilizado o sensoriamento remoto óptico e de microondas para monitorar e diagnosticar ambientes costeiros em escala espacial local a regional, em intervalos temporais com frequência anual a decadal. As principais iniciativas foram: i) mapeamento de unidades de paisagem com suscetibilidade natural à erosão e derramamento de óleo (DE ANDRADE et al., 2010; FILHO et al., 2009; GUIMARÃES, 2011b; RODRIGUES; SOUZA-FILHO, 2012); ii) caracterização

sedimentológica, espectral, textural e parâmetros biofísicos de alvos (COUGO et al., 2015; FRANÇA; SOUZA FILHO; EL-ROBRINI, 2007; GUIMARÃES, 2011a; SANTOS, 2006; TEIXEIRA, 2011); iii) reconhecimento de ambientes úmidos costeiros e mensuração espacial de sistemas erosivos/deposicionais (BATISTA et al., 2007; FRANÇA; SOUZA-FILHO, 2003; NASCIMENTO et al., 2013; SANTOS, 2006; SOUZA-FILHO et al., 2011; SOUZA FILHO et al., 2006). Nesses cenários, a utilização de dados SAR em ambientes costeiros tropicais úmidos se mostrou promissora, particularmente face aos avanços dessa tecnologia, com relação aos mecanismos de retroespalhamento, polarimetria, efeito *speckle* e decomposição de alvos, utilizando atributos coerentes e incoerentes extraídos do sinal complexo em amplitude e fase.

Santos (2006) utilizou imagens SAR GEMS, Radarsat-1 e JERS em amplitude para identificar ambientes costeiros por meio do emprego das técnicas de componentes principais, fusão multisensor e classificação pixel a pixel. O autor sugeriu futuras análises com imagens de radar em melhor resolução espacial na banda L multipolarizada aplicadas na planície de inundação.

Teixeira (2011) avaliou as respostas de retroespalhamento para os mangues e campos salinos da baixada maranhense, a influência do ângulo de incidência e caracterizou a microtopografia. Neste trabalho foi destacada a importância de medições de retroespalhamento e microtopografia sem influência de precipitação, preferencialmente no período seco, para mapear os ambientes costeiros e constatou que estudos avançados devem utilizar informação polarimétrica para permitir separabilidade entre ambientes úmidos.

Souza-Filho et al., (2011) utilizaram dados multipolarizados na banda L para identificar ambientes costeiros com a abordagem de classificação pixel a pixel. Com uma acurácia para coeficiente *Kappa* entre 0,65 a 0,73, os autores constataram o bom desempenho dos dados SAR na banda L para discriminar feições costeiras tropicais, incluindo corpos d'água, canais de maré, deltas, cordões arenosos, planícies lamosas, pântanos salinos e manguezais.

Imagens multitemporais em amplitude foram usadas por Nascimento et al., (2013) para mapear os ambientes costeiros da porção oriental da ZCA. A abordagem utilizada constou de uma classificação orientada a objeto, que resultou em uma acurácia temática para o coeficiente *Kappa* de 0,91 e 0,66 para o mapeamento de manguezais e detecção de mudanças, respectivamente. Os autores enfatizaram a importância do monitoramento com dados SAR em uma série mais longa.

Os recentes conjuntos de dados SAR orbitais podem aperfeiçoar o mapeamento topográfico ao utilizar o sinal complexo em amplitude e fase, revisitas sistemáticas e emprego das técnicas de radargrametria, Interferometria SAR (InSAR) e Polarimetria SAR (PolSAR).

Não há avaliações geométricas que considerem a elaboração/aplicação de MDSs nos relevos baixos da porção litorânea amazônica com escala igual ou melhor do que 1:50.000 classe A, em ambientes costeiros de comportamento parcialmente coerente a incoerente. As plataformas orbitais SAR têm aperfeiçoado a capacidade de imageamento no que se refere a resolução no terreno e ao tempo de revisita, conseqüentemente, potencializa-se o uso de radar.

Perante o exposto, o desafio está em aplicar as atuais plataformas SAR com alta resolução espacial e revisita interferométrica para elaborar produtos cartográficos no ambiente costeiro amazônico em escala equivalente a 1:50.000 classe A de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfico Brasileiro (PEC). Além disso, diante a variada disponibilidade de dados SAR, é destacável explorar parâmetros interferométricos e radargramétricos relacionados com a geometria de aquisição SAR orbital, os quais sejam adequados ao mapeamento dos ambientes costeiros amazônicos de relevo plano sujeito a inundações periódicas sob clima severo e forte dinâmica da paisagem, e assim, prover MDSs que atendam a uma escala cartográfica de detalhe, com possibilidade de atualização frequente.

1.3 Hipótese e Objetivos

O desempenho de dados SAR na elaboração de Modelos Digitais de Superfície (MDS) por interferometria e radargrametria está condicionado não apenas às condições de geometria de aquisição da imagem, mas também às características físicas e à dinâmica da região de interesse.

Ao se considerar um ambiente altamente dinâmico como a Zona Costeira Amazônica, caracterizado por relevos predominantemente baixos e planos, inundáveis periodicamente, coloca-se como hipótese: a condição de aquisição SAR em múltiplas passagens e revisita única por método radargramétrico resultará em um MDS com menor erro vertical do que o método interferométrico aplicado na mesma condição e esse erro será variável em função do tipo de ambiente costeiro considerado.

Diante do exposto, o objetivo geral deste estudo é avaliar o desempenho dos métodos interferométrico e radargramétrico na elaboração de Modelos Digitais de Superfície para diferentes ambientes da Zona Costeira Amazônica. Os seguintes objetivos específicos são:

- i) identificar na ZCA os setores de maior dinâmica costeira em um perfil temporal;
- ii) descrever os ambientes costeiros amazônicos em função das características de coeficiente de retroespalhamento e coerência;
- iii) elaborar e comparar MDSs radargramétricos e interferométricos gerados a partir de dados SAR de diferentes configurações e por diferentes métodos;
- iv) avaliar a acurácia vertical dos MDSs radargramétricos e interferométricos.

1.4 Estrutura da Tese

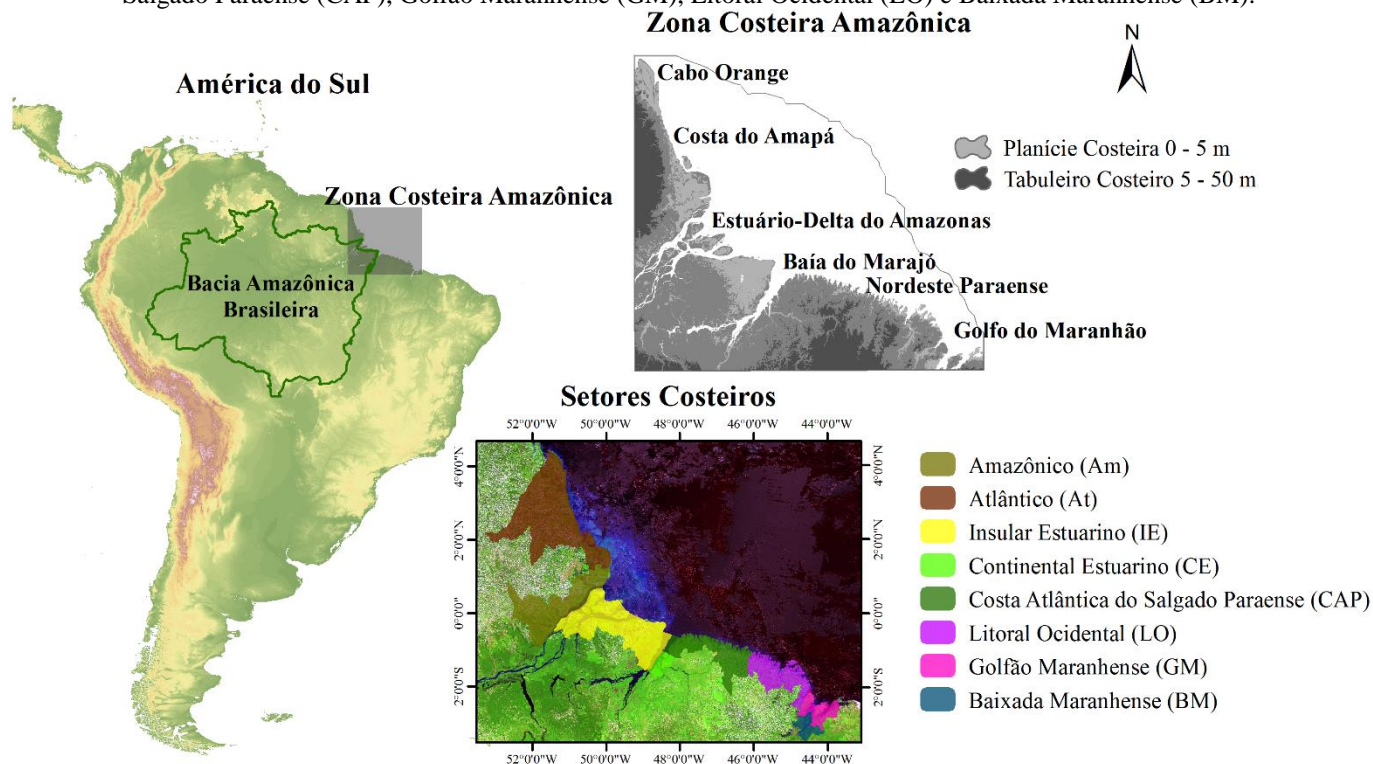
Esta tese está estruturada em sete capítulos. O capítulo 1 introduz o tema e o problema da pesquisa, seguido do estado da arte, contribuição, hipótese e objetivos. O capítulo 2 descreve a área de estudo, na perspectiva física e ambiental, como o componente singular e atípico a ser investigado na tese. O capítulo 3 apresenta os principais conceitos e referências que subsidiaram a especificação e realização dos experimentos, assim como a análise dos resultados e discussões. No capítulo 4 são apresentados os conjuntos de dados utilizados, a geometria de aquisição de acordo com as técnicas abordadas, os procedimentos adotados no levantamento de campo, além de expor o método geral do estudo para elaborar e avaliar os modelos. No capítulo 5 são expostos quatro experimentos compostos pelos respectivos objetivos, áreas de estudo métodos, resultados e discussões, e conclusões. O primeiro experimento foi realizado para delinear a área de estudo com maior dinâmica da paisagem costeira por meio de uma análise de variação de linha de costa no contexto regional para as últimas décadas. O segundo experimento aborda a interferometria SAR para produção de informação temática dos ambientes costeiros e com ênfase nas potencialidades e desvantagens. O terceiro experimento aborda a interferometria para produzir MDS e avalia a acurácia vertical dos respectivos modelos. Por fim, o quarto experimento aborda a radargrametria e diferentes modelos para se obter MDS em escala cartográfica de detalhe nos ambientes costeiros amazônicos. No capítulo 6 são destacadas as principais contribuições da pesquisa e os próximos direcionamentos em trabalhos futuros.

2. ÁREA DE ESTUDO

A ZCA corresponde a foz do Rio Amazonas e todas os ambientes costeiros influenciados pela sua pluma de sedimentos, em aproximadamente 2.300 km de linha de costa, desde o Golfo do Maranhão no Brasil até o delta do rio Orenoco na Venezuela. Especificamente para este estudo será considerada a porção brasileira com cerca de 1.200 km que corresponde a 16% da costa brasileira. A bacia amazônica é a principal contribuinte da ZCA, tornando esta costa totalmente singular, classificado como um ambiente estuarino deltaico em função do equilíbrio da gênese de um vale afogado, aliada a uma gigantesca vazão de água doce com $6.3 \times 10^{12} \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ e descarga de sedimentos da ordem de $1.2 \times 10^9 \text{ ton} \cdot \text{ano}^{-1}$ (NITTROUER et al., 1986, 1995). As condições hidrodinâmicas da ZCA são respostas do fluxo e refluxo de macro a meso-marés semidiurnas de 5 a 3 m, correntes que durante a preamar alcançam 2,1 a 1,9 nós e ondas com altura entre 0,3 e 1,5 m. A dinâmica dessa região proporciona feições retrogradacionais e progradacionais em contato com o planalto costeiro (EL-ROBRINI et al., 2006; ZAMBONI; NICOLODI, 2008).

A área de estudo é ZCA em território brasileiro que está compartimentada, de acordo com o macrodiagnóstico realizado por Zamboni e Nicolodi (2008), em oito setores costeiros localizados entre o Cabo Orange na Amapá até o Golfão do Maranhão nos quais incluem 73 municípios (Figura 3). Esta costa abriga aproximadamente 5,11 milhões de pessoas que corresponde a 2,68% da população brasileira com densidade demográfica de $35,18 \text{ hab} \cdot \text{km}^{-2}$ (IBGE, 2010). Para a definição da área experimental por dados SAR, foi investigada a dinâmica costeira de variações de linha de costa, em um perfil temporal de imagens ópticas de abrangência regional.

Figura 3 - Mapa de localização da ZCA e os respectivos setores costeiros abordados em Zamboni e Nicolodi (2008): Amazônico (Am), Atlântico (At), Insular Estuarino (IE), Continental Estuarino (CE), Costa Atlântica do Salgado Paraense (CAP), Golfão Maranhense (GM), Litoral Ocidental (LO) e Baixada Maranhense (BM).



2.1 Clima e Circulação Atmosférica

A física atmosférica é representada no litoral amazônico principalmente pelos movimentos de massa de ar e pela expansão/contração da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). A ZCIT caracteriza-se por ser uma zona de depressão barométrica causando uma linha de instabilidade que se desloca sazonalmente e provoca chuvas intensas e rápidas, determinando o regime pluviométrico da região. O clima é tropical quente-úmido com forte influência da ZCIT, o que propicia um período mais chuvoso de dezembro a maio com médias de 3000 mm e ventos médios de $6,2 \text{ m.s}^{-1}$; e um período menos chuvoso de junho a novembro com médias de 350 mm e ventos médios de 7 m.s^{-1} (MARTORANO, 1993).

Na porção oriental do litoral amazônico, os ventos deslocam-se em trajetória Leste (E) e predominantemente Nordeste (NE), soprando por influência do Anticiclone Tropical Atlântico e Anticiclone Tropical Atlântico Norte. O encontro desses alísios resulta na ZCIT. A intensidade dos ventos varia entre $5,03 \text{ m.s}^{-1}$ até $7,9 \text{ m.s}^{-1}$ (EL-ROBRINI et al., 2006).

A porção leste do Marajó, segundo Martorano (1993), é classificada de acordo com o método de Köppen, caracterizando o tipo climático Am1, chamado de clima de monção com temperaturas médias anuais em torno do $27,3^\circ \text{ C}$, enquanto a pluviosidade divide-se em dois

regimes: o chuvoso com precipitações médias em torno de 2.566 mm (alta influência da ZCIT) e no regime menos chuvoso com precipitações em torno de 414 mm (baixa influência da ZCIT).

2.2 Cobertura Vegetal

A Região Norte, inserida na Zona Neotropical, possui um ecossistema altamente diversificado para vegetação com adaptações às temperaturas médias de 25° C e grandes volumes pluviométricos bem distribuídos ao longo do ano, deste modo não apresentam grandes períodos em déficit hídrico (IBGE, 2012).

Na foz do rio Amazonas, segundo as definições do IBGE (2015), existe majoritariamente duas composições vegetacionais: i) formações florestais, compreendidas pelas tipologias de floresta ombrófila (densa e aberta), florestas secundárias (resultante de rebrota), florestas aluviais e manguezais; ii) formações campestres ou não-florestais, representando formações pioneiras, campos, savanas/cerrados e restingas.

A cobertura vegetal na borda leste do Marajó, de acordo com França (2003), apresenta similaridades tanto ao Planalto Costeiro, quanto com a Planície Costeira. Apresenta para o planalto, antes da ocupação antrópica, uma maior cobertura por matas de terra-firme e campos/savanas. Para a planície, ocorre a colonização por espécies pioneiras, mangues e restinga.

As Formações florestais ombrófilas possuem dossel uniforme e emergente, compostas por árvores altas e grossas (florestas primárias). Na área de estudo, a tipologia presente é ombrófila densa de terras baixas, caracterizada por ser perenifólia e adaptada à temperaturas quentes com umidade elevada praticamente o ano todo. Os indivíduos emergentes, por serem mais exigentes quanto a luz, possuem como representantes: *Tachigalea mirmecofila*, *Tetragastris altíssima*, *Caryocar villosum* e *Hymensae oblongifolium*. Os indivíduos que formam a abóbada estão distribuídos nas seguintes famílias botânicas: *Lecytidaceae*; *Sapotaceae*; *Busseraceae* e; *Leguminoseae* (PARÁ RURAL, 2010).

Estudos paisagísticos na parte ocidental da Ilha de Marajó e no Nordeste Paraense, como Azevedo et al. (2000), Venturieri e Bacelar (2010) e Watrin et al. (1996), evidenciam modificações na cobertura vegetal de espécies naturais para solo exposto e floresta secundária ao longo do processo de ocupação humana, em torno de mais de 50% das áreas avaliadas.

Vieira et al. (1967) descrevem as florestas aluviais localizadas no relevo de agradação (margeiam os rios com extensões variáveis) relacionadas ao processo de sedimentação, podendo ser de várzeas (alta e baixa) e igapó. No igapó encontra-se uma estrutura complexa de

espécies típicas como o açaí (*Euterpe oleracea*), o anani (*Sumphonta globurifera* L.), ucuúba (*Virola surinamensis* Warb.), mututi (*Pterocarpus amazonicus* Huber), palmeiras marajá (*Bacthis* sp.) e caraná. Na várzea baixa dominam várias espécies de palmeiras enquanto na várzea alta ocorrem a andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.), a pracaúba (*Mora paraensis* Ducke), o açacú (*Heira cripitus* L.) e o taperebá (*Spordias lutea* L.).

Os mangues são formações arbóreas importantes como fonte alimento e reprodução de diversas espécies que se constituem em nichos de influência de maré na transição do ambiente marinho e fluvial. A estrutura vegetal pode passar dos 30 metros e raízes emergentes até 8 metros. As principais formações são dos gêneros *Rhizophora*, *Lagunculária* e *Avicennia* (MENDES, 2003).

As áreas de savanas e cerrados ocorrem como manchas dispersas correspondendo a um consórcio de espécies gramíneas-herbáceas e gramíneas-arbóreas. Essas formações são mais suscetíveis e estão sempre relacionadas às áreas de capoeira. Exemplos dessa composição florística são: *Hancornia speciosa* Gom, *Curatella americana* L., *Hyrtella ciliata* (Mart ex Zucc) e *Salvertia convallariaeodora* A. St. Hill., *Trachypogon plumosus* (Nees) Kunth, *Cassia hispidula* Vahl, *Borreriaverticillata* G.F.W. Mey e *Bulbotylis junciformis* C.B. Clarke (ROSSETTI; GÓES, 2004).

Os campos são áreas extensas na planície amazônica, inundáveis durante o período chuvoso, constituídos predominantemente por gramíneas como *Poaceae*, *Cyperaceae*, e *Marantaceae* (FRANÇA, 2003).

2.3 Geologia e Geomorfologia

O Litoral Norte do Brasil tem características genéticas intimamente relacionadas à formação do Oceano Atlântico, resultado de processos geológicos de reativação tectônica Pós-Paleozóica. Os eventos tectono-magmáticos fragmentaram o bloco Gondwânico, propiciando a extrusão de magma alcalino e formação de bacias na margem continental e adjacências. Conseqüentemente, as redes de drenagens e a orientação da linha de costa obtiveram controle estrutural por falhas e fraturas, perceptíveis ao longo do litoral norte brasileiro, desde o Cabo Calcanhar (RN) até Oiapoque (AP), com direção predominante noroeste/sudeste (MUEHE, 2006; TESSLER; GOYA, 2005).

As unidades litoestratigráficas de interesse ao estudo estão relacionadas aos processos deposicionais/erosivos ocorridos no Terciário Superior e Quaternário. Assim, incluem-se a

Formação Barreiras e Grupo Pós-Barreiras, constituídas por coberturas lateríticas e sequências sedimentares do Quaternário, formando o substrato norte brasileiro (COSTA et al., 1996).

A Baía do Marajó recebe descarga de inúmeros rios, e esses são controlados basicamente pela precipitação e maré. O planalto costeiro possui uma rede de drenagem esparsa, ocorrendo cursos temporários e lagos. Os rios de pequeno porte são retilíneos e meândricos e têm orientação preferencial NNE-SSW e E-W. Na planície costeira, a rede de drenagem é composta por canais de maré com correntes de fluxo e refluxo que favorecem processos erosivos e o aporte sedimentar das praias, as orientações preferenciais são de E-W e S-N (BEMERGUY, 1997).

O contexto geológico/geomorfológico local na ZCA é caracterizado por duas unidades básicas de relevo: i) o planalto costeiro, que define um relevo de degradação sustentado em sua maior parte por sedimentos consolidados da formação Barreiras e grupo Pós-Barreiras, constituídos por camadas de arenitos e argilitos, que ocorrem na maioria das vezes em cotas altimétricas acima de 5 metros; ii) planície costeira, relevo de agradação caracterizado por camadas argilosas à arenosas de origem fluviomarinha, formando terraços, cordões, deltas de marés e planícies lamosas ao longo da costa, ocorrendo em cotas altimétricas em grande parte abaixo de 5 metros (COSTA et al., 1996; FRANÇA, 2003); e iii) terraços fluviomarinhos, tem cobertura campestre e está presente em cotas altimétricas entre a planície costeira de intermaré e o planalto costeiro, constituído por sedimentos quaternários com deposição lacustre, marinha e fluvial interligados por canais recentes e paleocanais, no período de alta pluviosidade se tornam inundados (FRANÇA; SOUZA FILHO, 2006).

3. REFERENCIAIS TEÓRICOS

3.1 Radar de Abertura Sintética

Radio Detection And Ranging (RADAR) é um acrônimo que significa detecção por distâncias, o qual é majoritariamente aplicado a faixa de microondas do espectro eletromagnético, com comprimentos de onda de 1 milímetro a 1 metro. O Radar possibilita uma perspectiva singular para realizar análises do terreno e contribuir para um entendimento amplo da paisagem (HENDERSON; LEWIS, 1998).

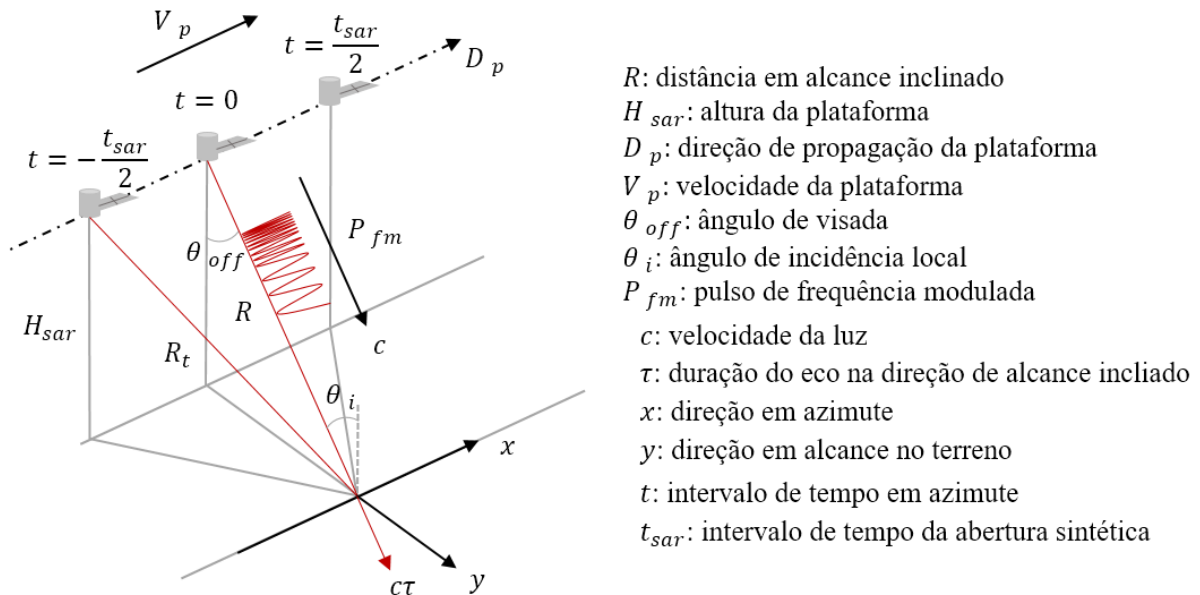
O Radar opera em regiões do espectro eletromagnético que definem um sinal com penetrabilidade em alguns tipos de materiais e, em especial, na atmosfera (nuvens e aerossóis). Esta especificidade viabiliza o estudo por sensoriamento remoto de regiões tropicais úmidas, com necessidades de mapeamento da superfície terrestre voltadas a aplicações em Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Oceanografia, e Uso e Cobertura da Terra, estimativa de biomassa, inundações dentre outros processos físicos no espaço-tempo (KASISCHKE et al., 1997).

Sistemas que operam na faixa de microondas do espectro eletromagnético e formam imagens são chamados de Radar Imageador. Isto significa operar em uma banda específica de comprimento de onda, diferentemente do espectro óptico, com intervalos de faixa espectral. As principais bandas de microondas são K, X, C, L e P e recebem essa denominação de herança das primeiras aplicações destes canais na área militar por razões de segurança (JENSEN, 2000).

O Radar é um sistema sensor ativo que transmite um sinal de energia eletromagnético para iluminar a superfície terrestre de maneira que seja possível medir a resposta de retorno do alvo. Por isso os sensores ativos de microondas são independentes da luz solar, possibilitando aquisições noturnas e em condições de tempo adversas. A geometria de aquisição dos radares imageadores em sistemas SAR (*Sinthetic Aperture Radar*) é o foco de discussão deste estudo que apresenta os principais parâmetros e suas implicações para as técnicas de interferometria e radargrametria no terreno baixo e plano da costa amazônica.

Sistemas SAR se caracterizam por ter propriedades coerentes que realizam medições acuradas em direção e alcance em condição de previsibilidade, por decorrência, há melhoria na resolução espacial em função da síntese de uma antena virtual baseada em princípios de interferência e na cadência de feixes sob efeito *Doppler* (WOODHOUSE, 2006). A transmissão de pulsos consecutivos para iluminar o alvo ao longo da trajetória da antena e o processamento de sinais combinados em diversos instantes e posições garante uma grande abertura sintética (Figura 4) (OUCHI, 2013).

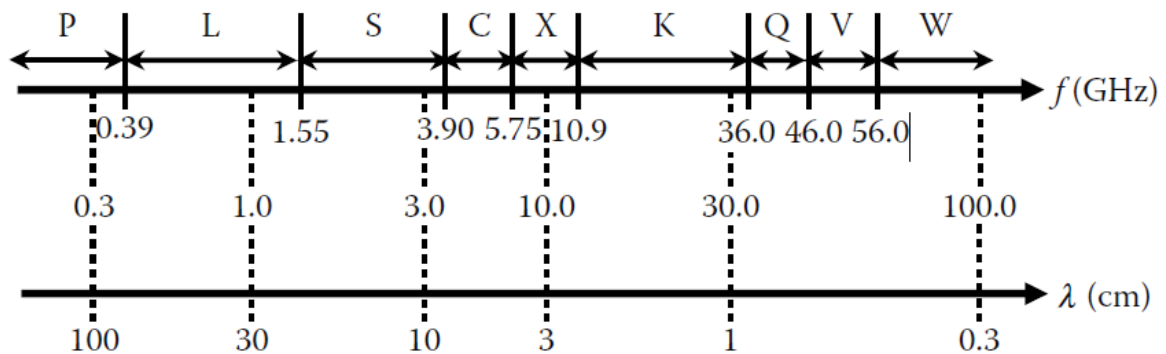
Figura 4 - Principais elementos da geometria de aquisição que compõe a combinação de sinais no intervalo de abertura sintética do radar.



Fonte: Adaptado de Ouchi (2013)

A primeira característica de um sistema sensor de Radar é a faixa espectral de microondas em comprimentos de onda no intervalo de 1 a 100 centímetros (Figura 5).

Figura 5 - Espectro eletromagnético na faixa de microondas.



A forma da antena é significativa para iluminar a área de cobertura em seu alcance perpendicular e azimuthal a direção de voo, de modo que as imagens são formadas linha a linha. Em radar, há a possibilidade das antenas de transmissão e recepção estarem em posições diferentes, definindo sistemas biestáticos, enquanto que, os sistemas monoestáticos tem o envio do pulso e recepção do eco na mesma posição (HENDERSON; LEWIS, 1998).

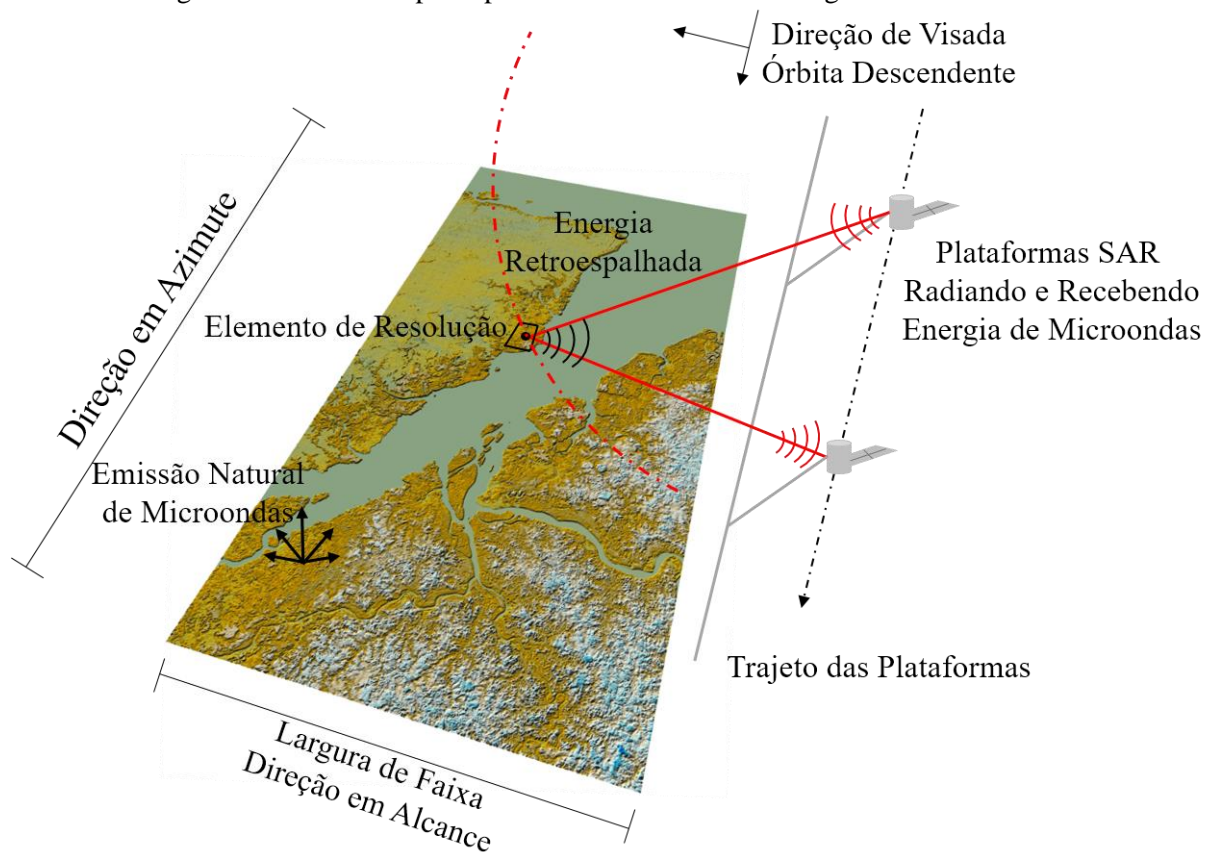
A polarização é uma propriedade aplicável aos radares que pode ser explicada como um componente do sinal de reflectância, de modo que a radiação de microondas é enviada em um

comportamento estruturado para a oscilação senoidal em um determinado eixo de propagação do sinal. Ao ocorrer uma mudança na oscilação senoidal do sinal de um eixo transmitido para um outro recebido, essa será detectada pela antena (RICHARDS, 2009). O comprimento de onda, a área de cobertura da cena e a polarização são parâmetros que modulam a resolução espacial e o sinal das imagens SAR.

A resolução espacial em radar é definida em alcance e em azimute, de modo que seja presumível medir a forma de onda produzida por dois objetos espaçados os quais tiveram ecos minimamente discrimináveis, sendo esses ecos detectados se tiveram pelo menos o dobro do sinal original de maior frequência a ser detectado (SHANNON, 1984). As melhorias em resolução espacial devem estar relacionadas a estabilidade da determinação da posição e atitude da plataforma, capacidade de armazenamento de ecos em sequência e o processo de aquisição azimutal (HENDERSON; LEWIS, 1998).

A célula de espalhamento é observada como um somatório de partes do eco recebido pelo Radar, o qual as estimativas de sinal estão relacionadas a geometria, radiometria e calibração. As condições de geometria denotam a relação entre a posição do espalhamento na imagem e a localização na cena. No caso de radar unidimensional (altímetros), a posição significa a distância ou alcance do radar à superfície iluminada. No caso bidimensional (radares imageadores), o eco tem a adição do azimute, neste aspecto a antena se move com um padrão de varredura circular ou linear (Figura 6). A imagem gerada corresponde ao registro de ecos em respectivas posições de alcance e azimute, e estes sinais ainda necessitam de correções de escala e distorções que a priori estão projetadas inclinadas, e a posteriori, são projetadas no terreno por ortorretificação (HENDERSON; LEWIS, 1998; JENSEN, 2000).

Figura 6 - Síntese dos principais elementos do Radar Imageador Monoestático.



Fonte: Adaptado de Richards (2009)

A radiometria está relacionada ao brilho de cada elemento de representação da imagem (pixel) derivado da intensidade do eco. Em radar, os ecos não são respostas únicas, pois muitos ecos são recebidos simultaneamente. A calibração significa a relação entre o valor numérico dos dados da imagem com as propriedades físicas dos objetos da cena. A partir da calibração radiométrica os diferentes brilhos registrados em várias partes da imagem são transformados em coeficientes de reflectância para área mapeada (WOODHOUSE, 2006).

Sistemas SAR geram sinais coerentes no espectro das microondas, a partir de técnicas de processamento de sinais em interferência, sob efeito Doppler e em frequência portadora comprimida, a resolução espacial resultante na superfície terrestre refletora é aprimorada. O sensor de microondas, instalado numa plataforma (aeronaves, satélites ou ônibus espaciais), adquire a imagem na geometria de visada lateral com iluminação perpendicular à direção da linha de voo. O sistema SAR ilumina a superfície da terra com um pulso e recebe um sinal eletromagnético de retroespalhamento do terreno iluminado. Este sinal é processado em um modelo matemático que combina sinais da cena para um único sinal atribuído na imagem formada (LEE; POTTIER, 2009).

Henderson e Lewis (1998) definem alguns princípios básicos para o entendimento de imagens SAR:

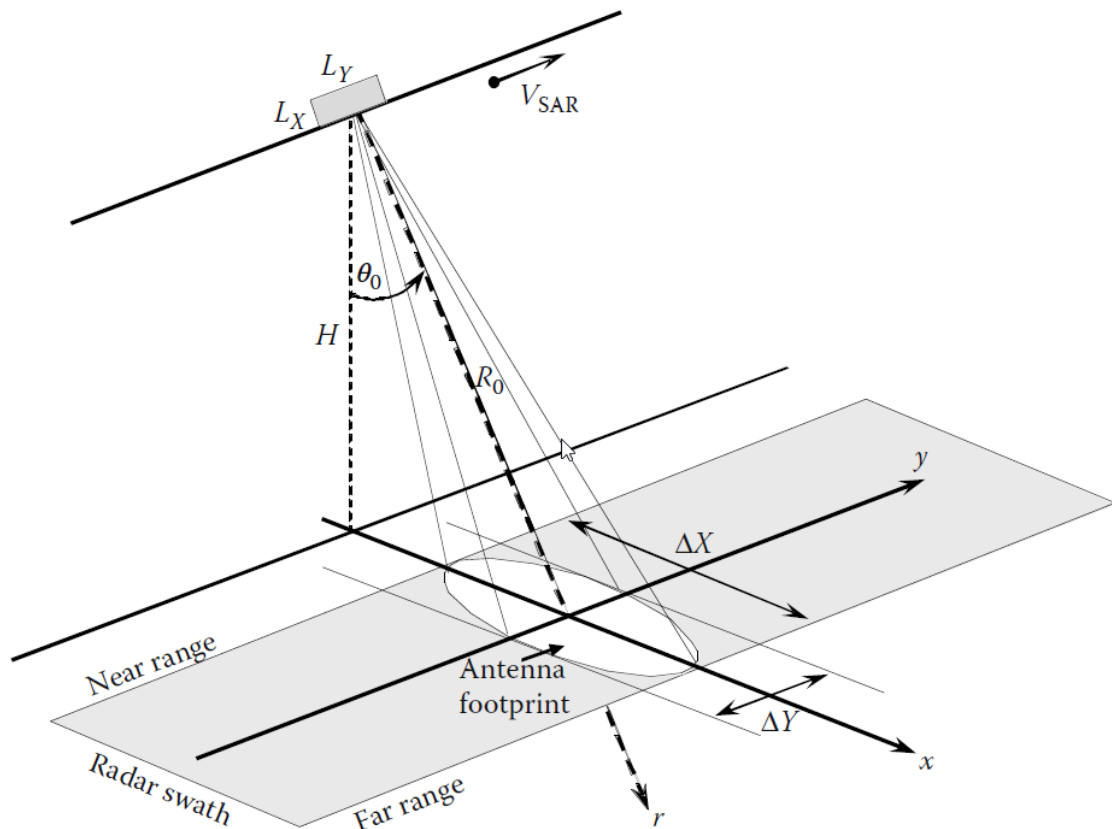
- i) Iluminação coerente: os dados de um sistema SAR são uma sumarização linear de voltagens provenientes de elementos refletores pontuais que são iluminados por uma onda de propriedade coerente no espectro de microondas;
- ii) Intensidade dos ecos: o domínio da imagem de radar é função da intensidade dos ecos derivados da superfície terrestre refletora em arranjo bidimensional;
- iii) Comportamento Gaussiano nas transformações: a transformação da cena para imagem deve se comportar como uma resposta de um ponto isolado de espalhamento, o qual esta resposta corresponde uma distribuição Gaussiana do espalhamento determinado em campo;
- iv) Conservação de energia: para qualquer cena, se há distribuição Gaussiana em campo, todo o conjunto de dados é usado em cada caso, logo o brilho de toda a área é uma constante independente da focalização ou coerência;
- v) Conservação da incerteza: para qualquer cena, se há distribuição Gaussiana em campo, todo o conjunto de dados é usado em cada caso, logo a incerteza associada de cada área da imagem é uma constante independente da focalização ou coerência;
- vi) Conservação das coordenadas: para um radar de alcance/Doppler, a imagem gerada é uma constante no sistema de geolocalização para coordenadas de alcance e azimute na superfície imageada, independente das rotações angulares do sensor.

Há três escalas para considerar questões geométricas em sistemas radar: a) alcance em distância (quilômetros); b) resolução espacial/pixel (metros); e, c) comprimento de onda (centímetros).

A maioria dos radares SAR de observação terrestre são sistemas monoestáticos os quais consistem de uma única antena usada na transmissão e recepção do sinal durante o movimento da plataforma. A operação de aquisição se dá em visada lateral para minimizar ambiguidades na direção em alcance. Os sistemas SAR situam-se a uma certa altitude (H) do solo e deslocam-se a uma velocidade (V_{SAR}) durante o imageamento. A antena está apontada na direção perpendicular à linha de voo que é referida como azimute (y). O feixe da antena se propaga na direção de alcance inclinado e projeta-se no terreno em um respectivo ângulo de incidência (θ), este formado entre a normal da superfície de referência e o trajeto do feixe. O eixo radial de

visada é referido como *Slant- Range* (R) e pode ser definido em sua porção mais próxima da plataforma (*Near Range*) e porção mais distante (*Far Range*). A área coberta pelo feixe da antena nas direções *Ground Range* (x) e azimute (y) é chamada área de iluminação da antena (Figura 7) (LEE; POTTIER, 2009).

Figura 7 - Geometria de aquisição de imagens SAR



Fonte: Lee e Pottier (2009)

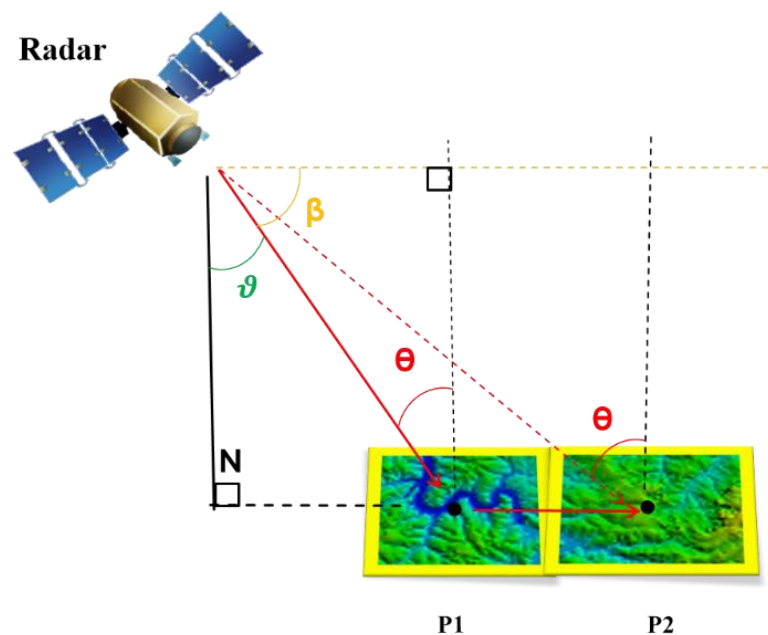
A direção de azimute é uma configuração própria de sistemas de visada lateral, o qual tem a antena em uma posição inferior e paralela à plataforma em sistemas aerotransportados, em sistemas orbitais os retroespalhadores ficam ao longo da carga útil paralelos a direção de órbita. Os pulsos de microondas são enviados formando um ângulo ortogonal à direção de voo. A direção de visada ou alcance é a direção de iluminação do sistema sensor de radar e tem impacto significativo na interpretação de feições, de maneira que elementos ortogonais a iluminação tem maior sinal de retroespalhamento do que elementos paralelos de forma geral (JENSEN, 2000).

O ângulo de incidência local (θ_0) é definido como o ângulo entre a linha do feixe de visada e a vertical local, considerando o geoide. Os sistemas SAR operam em altitudes constante o que implica predefinir o alcance inclinado e conseqüentemente o ângulo de

incidência. Radares orbitais permitem geometrias de aquisição com ângulos de incidências mais estreitos de menor variabilidade ao se comparar com radares aerotransportados, isto ao adotar a superfície da cena um plano. Sistema SAR em plataformas orbitais requerem a utilização de uma geometria esférica ou elipsoidal, esta última extremamente replicada nas plataformas de aquisição e processamento (HENDERSON; LEWIS, 1998; LILLESAND; KIEFER, 1999).

O ângulo de depressão (β) é usado para indicar o ângulo entre o feixe de visada com a projeção da horizontal na linha do sensor de radar. O ângulo de depressão é complementar ao ângulo de elevação (ϑ) o qual também é conhecido como ângulo de visada, e pode variar desde o *Near Range* ao *Far Range*. Em sistema de coordenadas de geometria plana o ângulo de depressão é complementar ao ângulo de incidência, mas isso não ocorre para plataformas orbitais em função do ângulo de incidência e largura de faixa considerarem a curvatura da Terra (HENDERSON; LEWIS, 1998; JENSEN, 2000; WOODHOUSE, 2006). A disposição dos ângulos depressão (β), visada (ϑ) e incidência (θ) é mostrada na Figura 8, estes ângulos variam ao longo da direção em alcance e podem ser vistos na Figura 8.

Figura 8 - Disposição do principais ângulos para aquisição de imagens de radar



Para a realização de medições radargramétricas é necessário considerar características específicas na geometria de imageamento (POLIDORI, 1997). A imagem não corrigida geometricamente é chamada de alcance inclinado (*Slant Range*) que é a distância real entre a plataforma do radar e uma feição na cena, variando de uma porção mais próxima o *Near Range*

e outra porção mais afastada o *Far Range*. A geometria do *Ground Range* é a distância horizontal real no terreno a qual corresponde a projeção da área em *Slant Range* na superfície. De acordo com Henderson e Lewis (1998) há uma relação matemática para a transformação entre as geometrias de dois pontos para terrenos dada por:

$$G_{rd} = H(\cot \beta_2 - \cot \beta_1) \quad (1)$$

sendo que:

G_{rd} : geometria em alcance no terreno;

H : altitude do sensor;

β : ângulo de depressão.

A resolução espacial em sistemas de radar é determinada pela relação entre alcance e azimute. A resolução em alcance (R_r) é medida em função da direção de iluminação do terreno (β) e o comprimento do pulso de microondas. O comprimento do pulso está relacionado à velocidade da luz (c) e o intervalo de transmissão do eco (τ). Quanto menor o pulso, maior é o detalhamento em alcance, ou seja, para ângulos de visada menores, a resolução é degradada enquanto ângulos de visada maiores, a resolução é melhorada (JENSEN, 2000; POLIDORI, 1997). A relação entre os parâmetros da resolução em alcance é dada por:

$$R_r = \frac{\tau * c}{2 * \cos \beta} \quad (2)$$

sendo que:

R_r : resolução espacial em alcance;

τ : intervalo de transmissão;

c : velocidade da luz

β : ângulo de depressão

A quantidade de energia que ilumina um ponto no terreno é proporcional ao comprimento do pulso, logo se houver pulsos muito pequenos isto implicará em sinais de retorno muito fracos. Teoricamente, é esperado que objetos na cena sejam diferenciadas até que estes estejam espaçados no mínimo pela metade do comprimento do pulso transmitido. Desta forma, para se melhorar a resolução em função do pulso utiliza-se um pulso comprimido por uma frequência modulada mais breve (HENDERSON; LEWIS, 1998; JENSEN, 2000; POLIDORI, 1997).

A resolução em azimute é determinada pela faixa imageada no terreno que é iluminada pelo pulso de radar. Imagens de radar são iluminadas por feixes na forma de lóbulos que estão diretamente relacionados ao comprimento de onda, com transmissões de círculos maiores ou

menores. Lóbulos menores tem pouca penetrabilidade na atmosfera e vegetação, entretanto, a largura do lóbulo também é função do comprimento da antena. Assim, para aumentar a resolução espacial em azimute são necessárias antenas de maior comprimento, e em sistemas SAR a antena é virtualmente aumentada por processos de combinação de sinais em condição de interferência ao longo de posições e instantes da antena para um mesmo alvo iluminado. Isto é imprescindível na melhoria de resolução espacial azimutal o que torna prático e operável o uso de sensores radar. As resoluções em azimute para radar de abertura real e sintética constam como:

$$R_a = \frac{R \cdot \lambda}{L}; SAR \rightarrow R_a = \frac{L}{2} \quad (3)$$

sendo que:

R_a : resolução espacial em azimute;

R : alcance inclinado;

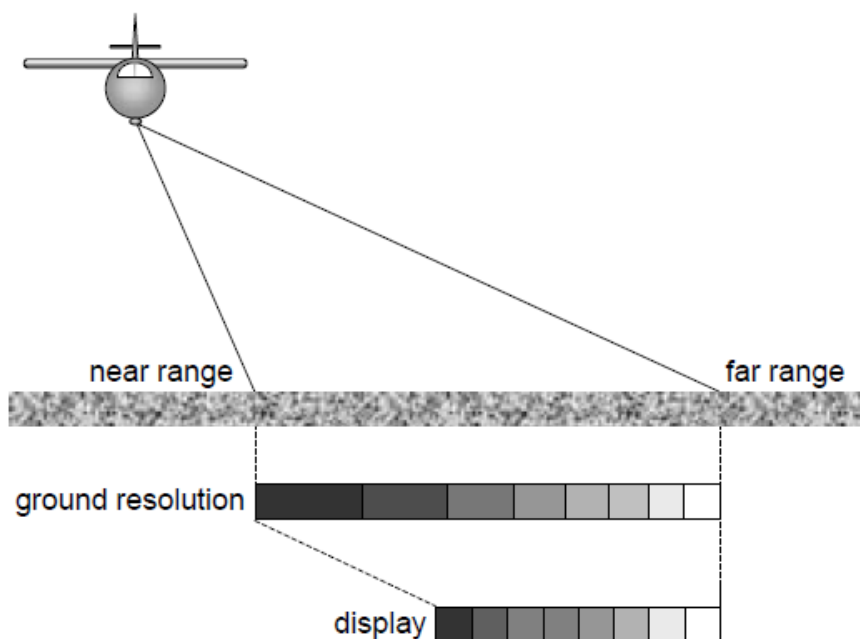
L : comprimento da antena.

De qualquer forma, a resolução na direção de azimute é função do comprimento de antena e do efeito Doppler, enquanto que a resolução em alcance é função da duração do pulso e do cosseno do ângulo de depressão ou seno do ângulo de visada.

Por diversos fatores do meio ambiente as imagens provenientes de sistemas SAR podem ter degradações no valor de brilho e na geometria. As fontes de distorções geométricas devem ser conhecidas e minimizadas com os devidos métodos da cadeia de processamento.

Para a resolução em alcance, a mínima região resolvível no terreno na direção perpendicular à linha de voo é maior para ângulos pequenos e menor para ângulos grandes o que provoca uma compressão das células de resolução próximas a antena e uma expansão as células de resolução mais afastadas da antena. Na resolução azimutal a distância mínima resolvível é a mesma no *Near Range* e *Far Range* (RICHARDS, 2009) (Figura 9).

Figura 9 - Compressão das células de resolução no sentido próximo a antena.

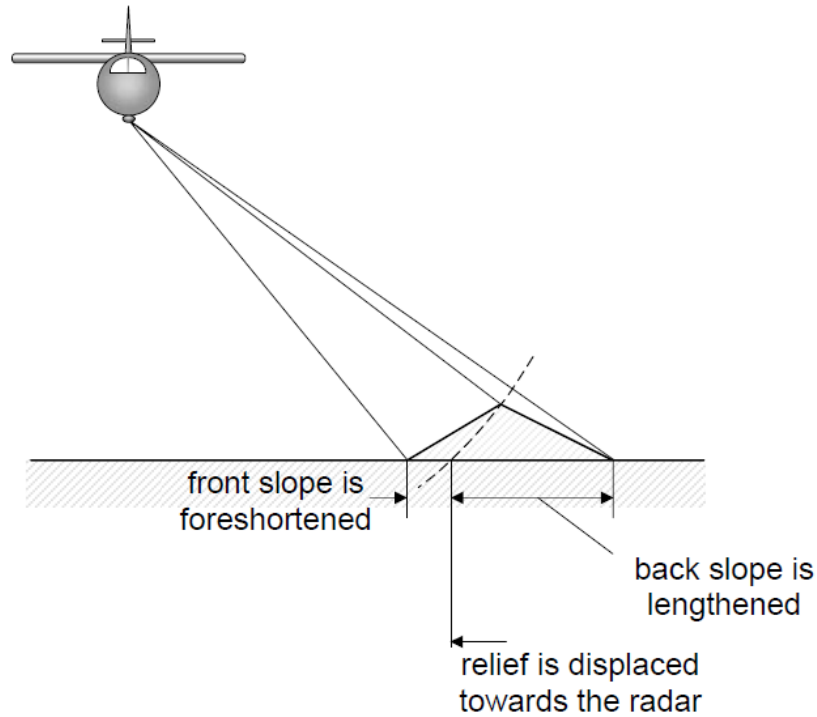


Fonte: Richards (2009)

Imagens de plataformas aéreas, por ter uma grande mudança no ângulo de incidência local, implicam drásticos efeitos de compressão na imagem em alcance no *Near Range*, ou seja, muitas partes do terreno são incluídas em uma única célula de resolução.

Os feixes de iluminação SAR podem ser assumidos como círculos que atingem feições verticais e as projetam no plano horizontal do terreno. A frente iluminada de vertente sofre encurtamento deslocando-se em direção da antena, enquanto que a vertente oposta a iluminação é alongada, assim uma feição apresenta seu topo deslocado em direção da antena. Feições de relevo com vertentes orientadas em direção à frente de iluminação SAR são comprimidas, em função da relação entre o ângulo de incidência, ângulo de depressão, altura do objeto, localização na imagem (*Near ou Far Range*) e a declividade (encosta frontal ou dorsal). O encurtamento de vertente ocorre quando a declividade da vertente/rampa é menor ou igual (encurtamento de vertente máximo) ao ângulo de incidência local (Figura 10) (JENSEN, 2000).

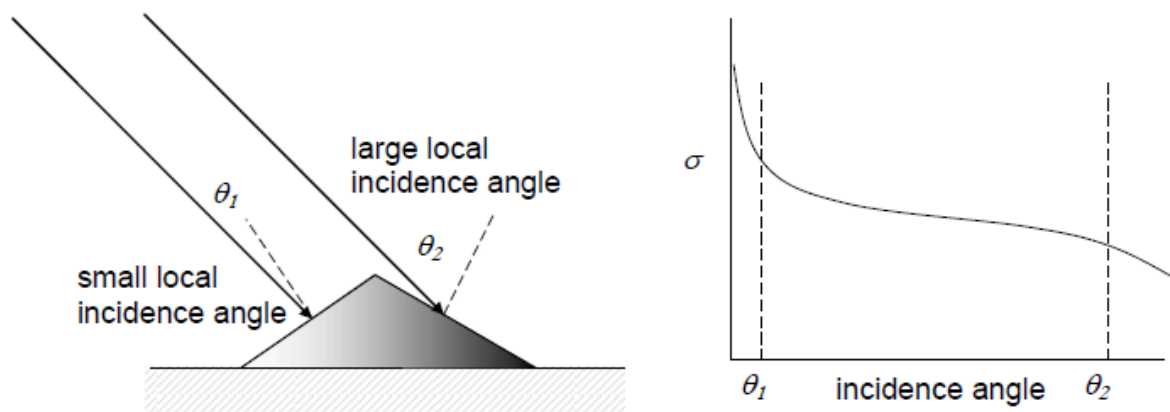
Figura 10 - Deslocamento da projeção do relevo na condição de encurtamento de vertente (declividade $\leq \theta_i$).



Fonte: Richards (2009)

A topografia de relevos montanhosos pode causar modificações no brilho das imagens que evidenciam a influência dos ângulos de incidência e depressão na quantidade de sinal retroespalhado, com maior intensidade (brilho claro) para as vertentes frontais e menor intensidade para as vertentes dorsais à iluminação (JENSEN, 2000) (Figura 11).

Figura 11 - Influência do relevo acidentado na modulação do coeficiente de retroespalhamento.

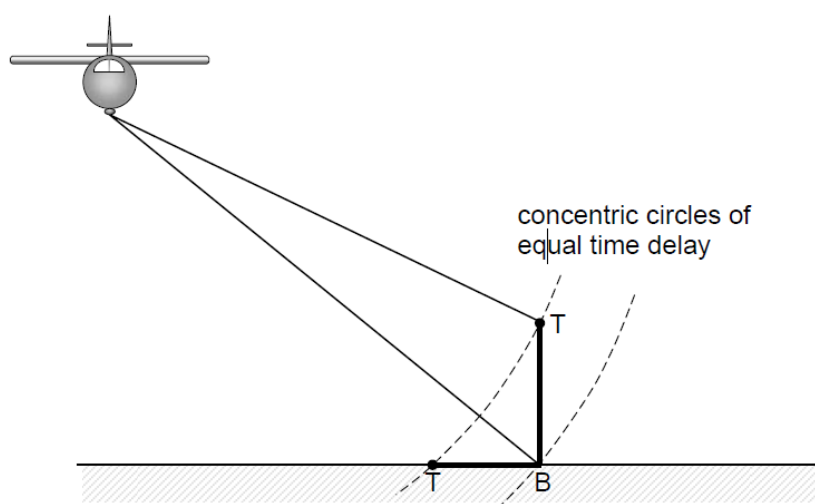


Fonte: Richards (2009)

Ao se considerar elementos no terreno com altura significativa, há uma diferença entre o registro de ecos da base da feição para com o topo, no qual tais ecos tem a frente de onda

como um círculo. Portanto, feições de maior altitude, por vezes, podem ter o eco do topo com menor distância em alcance chegando à antena receptora de radar primeiro do que a base com maior distância em alcance. Isto forma uma imagem da feição na forma invertida, devido o deslocamento horizontal de um objeto causado por sua elevação que ocorrer em direção da antena de radar. A inversão de relevo na imagem SAR é um caso extremo de encurtamento de vertente ou rampa, e este ocorre quando a declividade da rampa é maior que o ângulo de incidência local, no caso de vertentes íngremes (Figura 12) (JENSEN, 2000; RICHARDS, 2009).

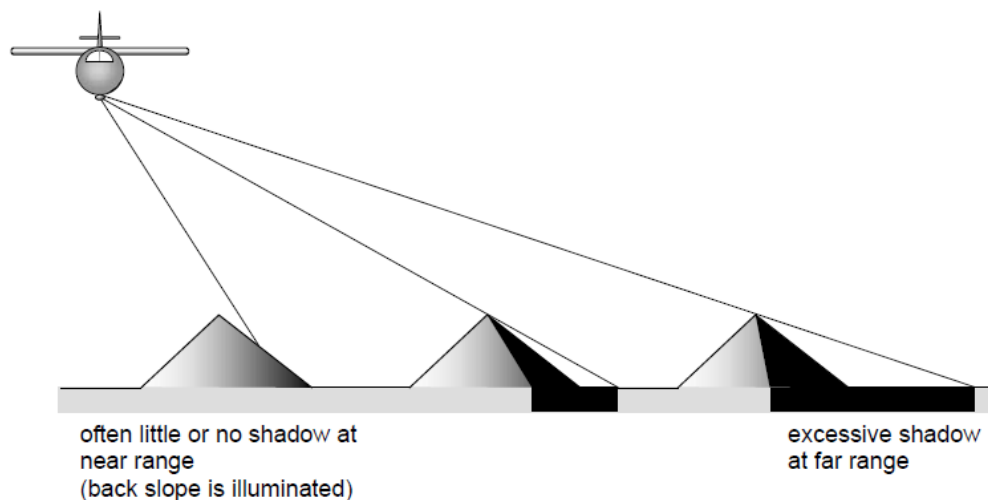
Figura 12 - Deslocamento da projeção do relevo na condição de inversão do relevo ($\text{declividade} > \theta_i$).



Fonte: Richards (2009)

As sombras ocorrem por oclusão da vertente frontal iluminada para com a vertente dorsal, de modo que esta última deve ter um ângulo de depressão menor do que a declividade da rampa. Sombras de radar são muito mais prováveis na porção *Far Range* e para grandes ângulos de incidência, ou seja, pequenos ângulos de depressão (Figura 13) (JENSEN, 2000; RICHARDS, 2009).

Figura 13 - Ocorrência de sombreamento na geometria de alcance inclinado observada a vertente oposta a iluminação (declividade da vertente dorsal $< \beta$).



Fonte: Richards (2009)

As principais variáveis relacionadas a geometria de aquisição SAR são: a direção de voo, direção de iluminação, ângulo de incidência, ângulo de depressão, ângulo de visada, geometria do alcance inclinado e azimuth. Suas características e aplicações estão diretamente relacionadas às feições no terreno. Distorções geométricas são intrínsecas ao processo de aquisição de imagens de radar e sua solução está na compatibilização entre as características do sensor/plataforma para com o terreno, além de aplicação de modelos rigorosos de correção geométrica capazes de recompor a cena de aquisição SAR. Assim, para definir ângulos de incidência adequados para aquisição de imagens deve-se considerar que: i) em regiões de relevo suave (gradual) grandes ângulos de incidência enfatizam feições topográficas, uma vez que a sombra auxilia na interpretação; ii) em regiões de alto relevo grandes ângulos de incidência minimizam inversão de relevo e distorções de relevo, entretanto, exageram em sombras; iii) distorções de relevo são mais impactantes em pequenos ângulos de incidência; iv) ao se utilizar plataformas orbitais e larguras de faixas satisfatórias (< 100 km), uma opção consistente é obter imagens SAR com ângulos de incidência intermediários a rasantes ($35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$) os quais podem minorar distorções de inversão de relevo e sombreamento, nesta amplitude o ângulo de incidência é significativo para interpretação em superfícies rugosas. Mesmo assim, fortes distorções de relevo são inevitáveis, a alternativa compensatória ocorre quando se pode observar a cena com mais de incidência e diferentes linhas de visada (FERRETTI; PRATI; ROCCA, 1999; HENDERSON; LEWIS, 1998; OUCHI, 2013; PARADELLA et al., 2009).

3.2 Interferometria SAR

A Interferometria SAR (InSAR) se refere a técnica de medição acurada para distâncias relativas entre duas ou mais ondas, as quais se interferem em condição de previsibilidade com base nas propriedades coerentes da radiação eletromagnética (WOODHOUSE, 2006). A técnica InSAR combina imagens complexas de microondas registradas por antenas em uma linha de base consistente, definida por diferentes localizações ou diferentes instantes no tempo (PARADELLA et al., 2012). A InSAR permite medições precisas com aplicações no mapeamento topográfico, temático, perfis temporais e deformações terrestres.

Radares SAR emitem radiação eletromagnética coerente no espectro de microondas, isto significa que o padrão senoidal da radiação eletromagnética é muito bem definido entre o mínimo e máximo, cada comprimento de onda corresponde a 360° ou 2π . As medições com técnicas InSAR tem duas observáveis: a amplitude e fase. A amplitude é a energia da onda eletromagnética retroespalhada que denota do alvo a intensidade do eco, forma geométrica, orientação do eixo de propagação e propriedades elétricas. A onda eletromagnética ao se propagar no espaço percorre distâncias discretas durante as quais a fase muda entre $-\pi$ a $+\pi$ para cada comprimento de onda percorrido em distância (MADSEN; ZEBCKER, 1998).

A interferência é a superposição de ondas num dado tempo e espaço, a qual propicia que fases de dois sinais de mesma frequência sejam interpostos variando em amplitude final de forma construtiva a destrutiva, e ainda, variando na posição das fases iniciais ora propagadas para a fase final recebida (WOODHOUSE, 2006). Ao se observar o sinal retroespalhado a partir de um alvo particular, este é comprimido em alcance e azimute e vinculado a uma frequência modulada (HANSSEN, 2002). Richards (2009) descreve o sinal retroespalhado como função da frequência operacional do radar, refletividade do pixel, a amplitude, distância entre o radar e a célula de resolução e fase constante, de acordo com a formulação:

$$E^r(t) = A\rho \exp(j\omega t - 2\beta R_p); \rho = |\rho|e^{j\epsilon\phi}; \beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4)$$

sendo que:

ω : frequência do radar;

ρ : refletividade do pixel;

A : amplitude;

R_p : distância do radar a célula de resolução

β : fase constante

A refletividade é o coeficiente da efetiva energia incidente que retorna do alvo no terreno com registro do sinal em amplitude e fase. Fase constante é a razão de um ciclo na função senoide (2π) dividido pelo comprimento de onda do radar (λ).

Hanssen (2002) propôs um cenário simplista para medir a fase que retorna de um espalhador pontual, dado como:

$$\varphi = \frac{2R_p 2\pi}{\lambda + \varphi_{scat}} \quad (5)$$

sendo que:

φ : fase;

R_p : distância do radar a célula de resolução;

λ : comprimento de onda;

φ_{scat} : contribuição da fase no retroespalhamento do alvo.

A extração da informação de fase é capaz de fornecer medidas acuradas da superfície e/ou alvos específicos, sendo que para analisar diferentes componentes do sinal é conveniente decompor a fase e minimizar fontes de erro decorrentes da atmosfera, separação espacial entre os satélites, propriedades elétricas e indeterminação do vetor de estado das plataformas.

A diferença de fase ($\Delta\varphi$) é dada por dois ou mais sinais de uma célula de resolução após percorrer um trajeto de transmissão e recepção (2R) com referência a uma plataforma mestre e serva. As medidas de diferença de fase são variações angulares proporcionais ao alcance inclinado do alvo imageado e inversamente proporcionais ao comprimento de onda. A decomposição da diferença de fase é expressa por oito contribuições (COLESANTI et al., 2003; FERRETTI et al., 2001):

$$\Delta\varphi = \varphi_{flat} + \varphi_{topo} + \varphi_{orbit} + \varphi_{defo} + \varphi_{tropo} + \varphi_{iono} + \varphi_{scat} + \varphi_{noise} \quad (6)$$

sendo que:

$\Delta\varphi$: fase interferométrica;

φ_{flat} : fase da superfície plana;

φ_{topo} : fase topográfica;

φ_{orbit} : erros provenientes da informação de órbita

φ_{defo} : fase da deformação do terreno

φ_{tropo} : fase da troposfera

φ_{iono} : fase da ionosfera

φ_{scat} : fase do retroespalhamento do alvo

φ_{noise} : termo de ruído combinado

O somatório das contribuições de fase está atrelado ao objetivo da técnica InSAR, ou seja, dependendo do objetivo do mapeamento, as decomposições da fase podem ser o objeto de análise ou ruído. As fases de ϕ_{flat} , ϕ_{topo} e ϕ_{defo} são derivadas da equação de diferença em alcance de passagem dual descrita em função das orbitas dos satélites e topografia. As mudanças em alcance são baseadas na equação (BAMLER; HARTL, 1998):

$$\Delta\phi_{flat,topo,defo} = \frac{4\pi}{\lambda\Delta R} \quad (7)$$

sendo que:

λ : comprimento de onda;

ΔR : diferença em alcance entre a primeira e segunda passagem;

A remoção de fase plana da superfície é devido a forma da terra a qual deve utilizar as informações de órbita do satélite e um datum de referência, portanto, deve se considerar a diferença de fase obtida para uma superfície plana contra a atual forma da terra. A ϕ_{flat} pode ser calculada por (DEOS, 2009):

$$\phi_{flat} = 4\pi/\lambda B_{\parallel} \quad (8)$$

sendo que:

B_{\parallel} : linha de base paralela calculada para cada pixel;

A ϕ_{topo} é a contribuição da fase no interferograma e é decorrente das elevações no terreno com referência ao elipsoide, neste caso, é função da linha de base perpendicular (FERRETTI et al., 2007):

$$\phi_{topo} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}}{R \sin \theta \Delta Z} \quad (9)$$

sendo que:

B_{\perp} : linha de base perpendicular ou normal;

R : distância alvo satélite;

θ : ângulo de visada da antena;

ΔZ : elevação a partir da referência elipsoidal;

As contribuições de ϕ_{flat} e ϕ_{topo} se resumem aos parâmetros especificados na geometria de aquisição, para a B_{\parallel} e B_{\perp} , portanto qualquer erro proveniente da determinação das orbitas incidirá no erro de fase residual contemplado pela ϕ_{orbit} .

A φ_{defo} é a diferença da fase interferométrica com a contribuição da deformação do terreno (soerguimento ou subsidência) relativo à direção da linha de visada do radar com medição normal ao terreno por meio de aquisições descendente e ascendente. Essa decomposição da fase deve ser obtida pela diferença da distância em alcance ocasionada pela movimentação do terreno de acordo com a formulação (FERRETTI et al., 2007):

$$\varphi_{defo} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{defo} \quad (10)$$

sendo que:

ΔR_{defo} : diferença na distância em alcance devido a deformação da superfície.

Durante as aquisições interferométricas de passagem múltipla (diferentes instantes no tempo), a condição da atmosfera muda entre os pares o que denota contribuição na fase. A φ_{tropo} é resultante do índice de refração da troposfera que é ligeiramente superior ao do vácuo no espaço em 1 (ZEBKER et al, 1997). O atraso no percurso da troposfera pode ser separado em úmido e seco, geralmente, está contido dentro de um ciclo de fase para banda C e radares de frequências maiores (FERRETTI et al., 2007).

$$\varphi_{tropo} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{tropo} \quad (11)$$

sendo que:

ΔR_{tropo} : diferença na distância em alcance devido ao atraso troposférico.

Radares de menores frequências, como banda L, sofrem maior influência da ionosfera devido a mudanças no conteúdo total de elétrons, pois afeta a fase interferométrica causando desfocagem ao longo das direções de alcance e azimute, causando perda de coerência devido a rotação de Faraday (WEGMULLER et al., 2006). Os atrasos decorrentes da concentração total de elétrons na ionosfera são calculados por:

$$\varphi_{iono} = 1.69 \cdot 10^{-6} N \lambda \quad (12)$$

sendo que:

N : número de elétrons por unidade de área;

λ : comprimento de onda.

As mudanças na fase interferométrica provenientes das propriedades de espalhamento elétrico (φ_{scat}), usualmente, são assumidas como negligenciáveis para aplicações topográficas

e em deformações no terreno. Contudo, a estimativa de profundidade de penetração e conteúdo de água, os quais alteram as propriedades dielétricas, e consequentemente o retroespalhamento, são considerados contribuições sutis na diferença de fase que são geralmente dominadas pelos maiores contribuintes como topografia e deformação (OSMANOĞLU et al., 2016). Estudos detalhados da φ_{scat} devem ser direcionados em ambientes controlados com significativo entendimento do retroespalhamento para minimizar maiores contribuintes.

Por último, o termo de fase referente ao ruído (φ_{noise}) está atrelado a coerência do par interferométrico, e pode ser decomposto em quatro componentes de descorrelação, segundo Zebker e Villasenor (1992) por:

$$\gamma_{total} = \gamma_{espacial} + \gamma_{Doppler} + \gamma_{temporal} + \gamma_{termal} \quad (13)$$

sendo que:

γ_{total} : coerência interferométrica;

$\gamma_{espacial}$: descorrelação espacial da linha de base espacial;

$\gamma_{Doppler}$: descorrelação espacial da frequência Doppler centroide;

$\gamma_{temporal}$: descorrelação temporal;

γ_{termal} : descorrelação termal;

A $\gamma_{espacial}$ está relacionada a separação horizontal entre duas orbitas de satélites. A $\gamma_{Doppler}$ é provocada por efeito das disparidades entre as efemérides dos satélites, sobretudo, aos ângulos *yaw*, *roll* e *pitch*, e consequentemente, ao ângulo *squint* (Ψ). A $\gamma_{temporal}$ ocorre pela mudança física do retroespalhador ao longo da aquisição interferométrica na célula de resolução, dentre os mecanismos de espalhamento, o volumétrico tem maior susceptibilidade a descorrelação temporal. A γ_{termal} está ligada aos componentes eletrônicos do sensor a qual tem contribuição insignificante na diferença de fase para aplicações voltadas a topografia e deformação (CROSETTO et al., 2016).

A reconstrução tridimensional da superfície por meio de produtos interferométricos está vinculada a sensibilidade altimétrica do sistema radar em aquisição dual e a fontes de descorrelação que comprometem a estimativa da diferença de fase (FERRETTI et al., 1999).

Características topográficas são indicadas pela intensidade de retroespalhamento em amplitude ao se utilizar técnicas como clinometria ou radargrametria, porém o cômputo acurado de mudanças no gradiente altimétrico é propiciado pela informação de fase (MADSEN; ZEBCKER, 1998). A cota altimétrica de um ponto na superfície pode ser aproximada por meio de uma geometria de aquisição ligeiramente diferente de um triângulo retângulo que considera

duas plataformas em uma altitude e alcances inclinados conhecidos, segundo Gens e Vangenderen (1996) e Graham (1974) dado por:

$$h = H - R \cos \theta \quad (14)$$

sendo que:

h : cota altimétrica na célula de resolução;

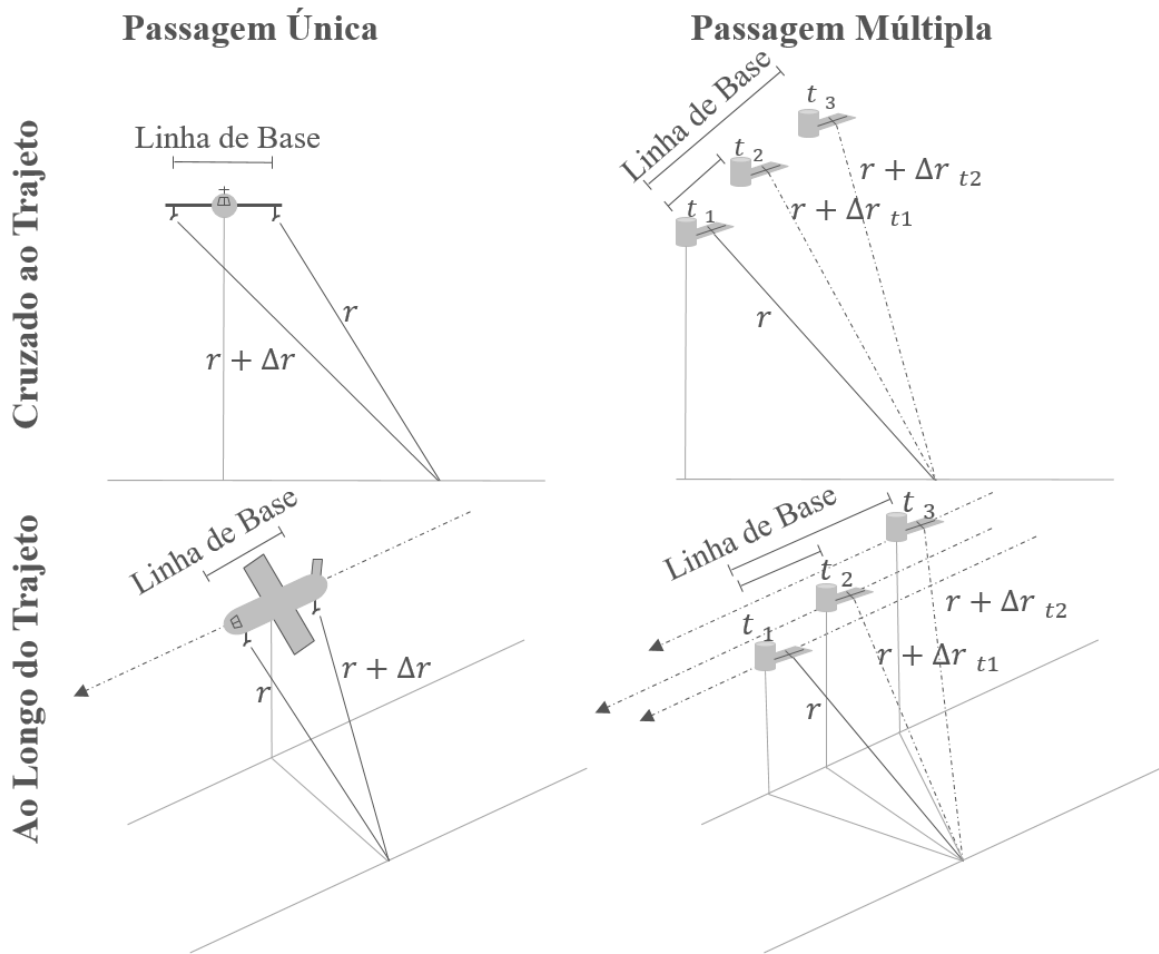
θ : ângulo de incidência na célula de resolução;

H : altitude da plataforma;

R : distância em alcance.

A ambiguidade direcional inerente ao sistema de radar imageador é solucionada, nas técnicas InSAR, pelo uso de uma geometria de aquisição dual com antenas separadas por uma linha de base no plano do alcance perpendicular à linha de voo (WOODHOUSE, 2006). A geometria de aquisição dual permite a formação de pares interferométricos, estes são indexados em camadas conjugadas em nível de subpixel com formato complexo que contém informação de amplitude e fase. As aquisições de pares interferométricos podem ser feitas no modo de passagem única ou passagem múltipla (repetida), ambas podem ter a disposição das antenas no radar alocada em condição cruzada a trajetória ou ao longo da trajetória (Figura 13) (RICHARDS, 2009).

Figura 14 - Modos fundamentais de aquisição de pares interferométricos em passagem única e passagem múltipla com configuração cruzada e ao longo do trajeto.



Fonte: Richards (2009)

O modo de aquisição de passagem única é a configuração que utiliza duas antenas coletando eco, em condição de paralaxe, em um único instante, o que implica em maior acurácia para observações de elevação, por diminuir a decorrelação temporal dos sinais. O modo de aquisição de passagem múltipla se caracteriza por uma única antena coletora de sinais com defasagem temporal. Portanto, as imagens de radar redundantes são geradas após um intervalo de tempo (revisita) em que a órbita do sistema SAR é refeita em similar trajeto, consequentemente as condições do alvo (constante dielétrica) e o meio físico (atmosfera) podem alterar, diminuindo a correlação dos sinais (BAMLER; HARTL, 1998; HANSSSEN, 2002). A atmosfera é dinâmica, e por consequência, passagens sucessivas de radar sempre possuem diferenças relativas ao meio físico.

O equacionamento InSAR tem solução mínima pela formação de um conjugado complexo em amplitude e fase, o qual é composto por uma imagem mestre e uma imagem serva. Esta composição ocorre pela sobreposição de feixes de radar com origem concêntrica

$z_M z_S = A_I e^{i\varphi}$: produto das imagens conjugadas complexas.

A sensibilidade altimétrica, em InSAR, depende do afastamento horizontal das órbitas dos satélites, portanto, é necessário um compromisso entre a extensão da linha de base e a decorrelação espacial. Linhas de bases muito pequenas detectam variações de diferença fase de ordem pequena, com baixa resolução altimétrica. Por outro lado, linhas de base muito extensas têm geometrias de aquisição dispares que causam uma diminuição na coerência entre alvos, e conseqüentemente, a razão sinal-ruído (MURA, 2001). A sensibilidade da fase interferométrica para a detecção da elevação é proporcional à linha de base perpendicular ou normal (B_{\perp}) e varia de acordo com o comprimento de onda e direção em alcance para um certo ângulo de incidência (BAMLER; HARTL, 1998). A sensibilidade altimétrica da fase interferométrica é expressa por:

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta z} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}}{R_p \sin \theta} \quad (16)$$

sendo que:

$\frac{\Delta\phi}{\Delta z}$: sensibilidade altimétrica;

R_p : distância em alcance para a célula de resolução no terreno;

B_{\perp} : linha de base perpendicular;

θ : ângulo de incidência;

A linha de base espacial controla o grau de mudança da fase com o ângulo de incidência. Para dimensionar a elevação no terreno capaz de provocar mudança de fase em uma franja interferométrica equivalente a 2π , estima-se a altura de ambigüidade após a remoção da fase plana. Quanto maior a altura de ambigüidade, menor será a sensibilidade para pequenas elevações, a qual é expressa segundo Hanssen (2002) por:

$$h_a = \frac{\lambda R_p \sin \theta}{4\pi B_{\perp}} \quad (17)$$

sendo que:

h_a : altura de ambigüidade;

R_p : distância em alcance para a célula de resolução no terreno;

B_{\perp} : linha de base perpendicular;

λ : comprimento de onda;

θ : ângulo de incidência;

A composição da linha de base perpendicular ou normal possui uma extensão adequada para medições InSAR, a qual está relacionada a parâmetros do sistema SAR como o comprimento de onda, o alcance próximo, a resolução em alcance e o ângulo de incidência. A variação de fase de um ciclo (2π) não pode ser inferior a uma única amostragem no terreno em alcance (R_r), o que configura um limiar crítico, visto que é impraticável obter variações de fase no nível de subpixel. Linhas de base perpendiculares que superam o limiar crítico para uma dada configuração SAR produzem interferogramas ruidosos de baixa coerência (RICHARD, 2009; SARMAP; 2013). A linha de base crítica é calculada por:

$$B_{\perp cr} = \frac{\lambda R_p \tan \theta}{2R_r} \quad (18)$$

sendo que:

$B_{\perp cr}$: linha de base espacial crítica;

R_p : distância em alcance para a célula de resolução no terreno;

R_r : distância em alcance para a célula de resolução no terreno na direção de alcance;

λ : comprimento de onda;

θ : ângulo de incidência;

Modelar a diferença de fase com diferentes contribuições é fundamental para aplicar a cadeia de processamento InSAR, e para tanto, é necessário considerar fontes de descorrelação, majoritariamente relacionadas à linha de base espacial e temporal. Os efeitos aditivos no computo da diferença de fase têm natureza estocástica, e, assim a determinação da adequabilidade de pares interferométricos para métodos InSAR deve considerar a geometria dual dos radares e flutuações aleatórias devido ao ruído (WOODHOUSE, 2006).

A estimativa da coerência interferométrica é a medida da correlação espacial dos sinais complexos de radar para qual pressupõe-se condições de espaço estacionário e ergodicidade, ou seja, há propriedades coerentes dos alvos retroespalhadores inalteráveis em prolongado período de tempo com relação ao comportamento médio no tempo e espaço. A coerência interferométrica é um indicativo conciso da medida de diferença de fase, e representa a força da correlação, para cada célula de resolução entre o sinal complexo conjugado da imagem mestre e serva. O estimador da coerência interferométrica é o coeficiente de correlação complexo $|\gamma|$ com módulo variando entre 0 a 1, definido por um operador de média espacial $\langle \cdot \rangle$ aplicado no par interferométrico coregistrado ($p_1 p_2^*$) no nível de subpixel (HANSSEN, 2002; RICHARDS, 2009). O estimador da coerência interferométrica é expresso por:

$$\gamma = \frac{|\sum_{r=0}^{r-1} \sum_{c=0}^{c-1} I_1(r,c) I_2^*(r,c)|}{\sqrt{|\sum_{r=0}^{r-1} \sum_{c=0}^{c-1} I_1(r,c)^2| |\sum_{r=0}^{r-1} \sum_{c=0}^{c-1} I_2(r,c)^2|}}; \quad 0 \leq |\gamma| \leq 1 \quad (19)$$

sendo que:

γ : coerência interferométrica complexa;

I_1 : imagem mestre;

I_2 : imagem serva;

I^* : complexo conjugado do par interferométrico;

(r, c) : matriz de n linhas e colunas;

$| \quad |$: janela móvel espacial para obter a covariância e desvio padrão das imagens complexas, e assim, estimar a correlação cruzada normalizada.

A coerência interferométrica indica no par interferométrico se uma superfície/alvo têm comportamento coerente ou incoerente face a iluminação por radiação coerente de microondas com redundância. Observa-se nas imagens conjugadas a maior presença de sinal ou ruído por meio do módulo de γ . Aplicações com propósito de cartografia devem ter módulo de γ superior a 0,7 segundo CCRS (1999), conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Limiares de coerência interferométrica para aplicação cartográfica.

Coerência Interferométrica	Qualidade
0,0-0,3	Baixa
0,3-0,5	Moderada
0,5-0,7	Boa
0,7-1,0	Excelente

Fonte: CCRS (1999)

3.3 Radargrametria

Radars imageadores tem por princípio medir distâncias em alcance de alvos na superfície, e, inerente a este processo há ambiguidade das medições face a variação topográfica e intensidade do eco. Para a reconstrução da superfície topográfica tridimensional, por meio dos dados de alcance e direção (azimute), é possível utilizar o princípio da estereoscopia com uma observável e dois observadores (WOODHOUSE, 2006). A estereoscopia é o método que permite a restituição tridimensional (3D) de objetos, com base em observações tomadas em ângulos ligeiramente diferentes, os quais denotam disparidades nas projeções dos objetos relacionadas a profundidade (WOLF; DEWITT, 2000). A radargrametria é uma abordagem formulada nos princípios geométricos da fotogrametria, com construção de modelos estereoscópicos relacionando às coordenadas homólogas entre um estéreo par e a superfície do terreno. Nesse sentido, são necessárias adaptações geométricas referentes as distorções topográficas e a interseção entre feixes providos por esferas concêntricas em um cone Doppler (POLIDORI, 1997). A radargrametria é a técnica capaz de extrair informações geométricas de objetos contidos em imagens de radar (LEBERL, 1990).

Modelos radargramétricos realizam conjecturas baseadas em parâmetros do radar (frequência, antena, ângulo de incidência e etc.), vetor de estado (posição, velocidade e atitude) e sistema de referência terrestre (elipsoide, geoide e projeção) (MÉRIC et al., 2009). Medidas físicas suportadas por radares imageadores se constituem em obter distância em alcance inclinado entre a fonte de emissão do pulso e o alvo na superfície, baseado na velocidade de propagação da onda eletromagnética (parâmetro conhecido) e o tempo de retorno do eco. Leberl (1998) descreveu a formulação matemática para relacionar vetores unitários entre o sistema do sensor ($\underline{w}, \underline{u}, \underline{v}$), objeto e sistema de coordenadas ($\underline{e}_1, \underline{e}_2, \underline{e}_3$) em um dado instante (t), aliado às informações de posição e atitude para a plataforma e antena, dado uma específica elevação (θ) e ângulo *squint* (Ψ), expresso por:

$$\overline{P} = S + A \cdot \overline{P^*} \quad (20)$$

sendo que:

\overline{P} : coordenadas do objeto (x, y e z);

S: coordenadas de posição do sistema sensor;

A: matriz de rotação entre os sistemas de coordenadas e do sistema sensor;

$\overline{P^*}$: inversão das coordenadas do espaço objeto para o sistema sensor.

O vetor de posição do objeto ($\overline{P^*}$) na posição P é expresso por:

$$\begin{cases} \overline{P^*} = u_p \cdot u + v_p \cdot v + w_p \cdot w \\ u_p = R \operatorname{sen} \Psi \\ v_p = R \sqrt{(\operatorname{sen}^2 \theta - \operatorname{sen}^2 \Psi)} \\ w_p = -R \cos \theta \end{cases} \quad (21)$$

sendo que:

R : distância em alcance inclinado;

Ψ : ângulo *squint*;

θ : ângulo de visada entre o objeto e o sistema sensor

u, v, w : eixos longitudinal, vertical e transversal da antena no radar;

A posição do sensor (S) e a antena (primeira derivada da posição do sensor) estão sujeitas as mudanças de atitude em $\varphi(t)$, $\omega(t)$, $\kappa(t)$ em que S é expressa por:

$$S(t) = [X_s(t), Y_s(t), Z_s(t)]^T \quad (22)$$

A matriz de rotação (A) relaciona elementos entre o sistema do sensor e o sistema cartesiano ($\underline{w}, \underline{u}, \underline{v} \rightarrow \underline{e}_1, \underline{e}_2, \underline{e}_3$) dado por:

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} \quad (23)$$

sendo que:

$$a_{11} = \cos \varphi \cdot \cos \kappa$$

$$a_{12} = \operatorname{sen} \varphi \cdot \cos \kappa \cdot \operatorname{sen} \omega - \operatorname{sen} \kappa \cdot \cos \omega$$

$$a_{13} = \operatorname{sen} \varphi \cdot \cos \kappa \cdot \cos \omega + \operatorname{sen} \kappa \cdot \operatorname{sen} \omega$$

$$a_{21} = \cos \varphi \cdot \operatorname{sen} \kappa$$

$$a_{22} = \operatorname{sen} \varphi \cdot \operatorname{sen} \kappa \cdot \operatorname{sen} \omega + \cos \kappa \cdot \cos \omega$$

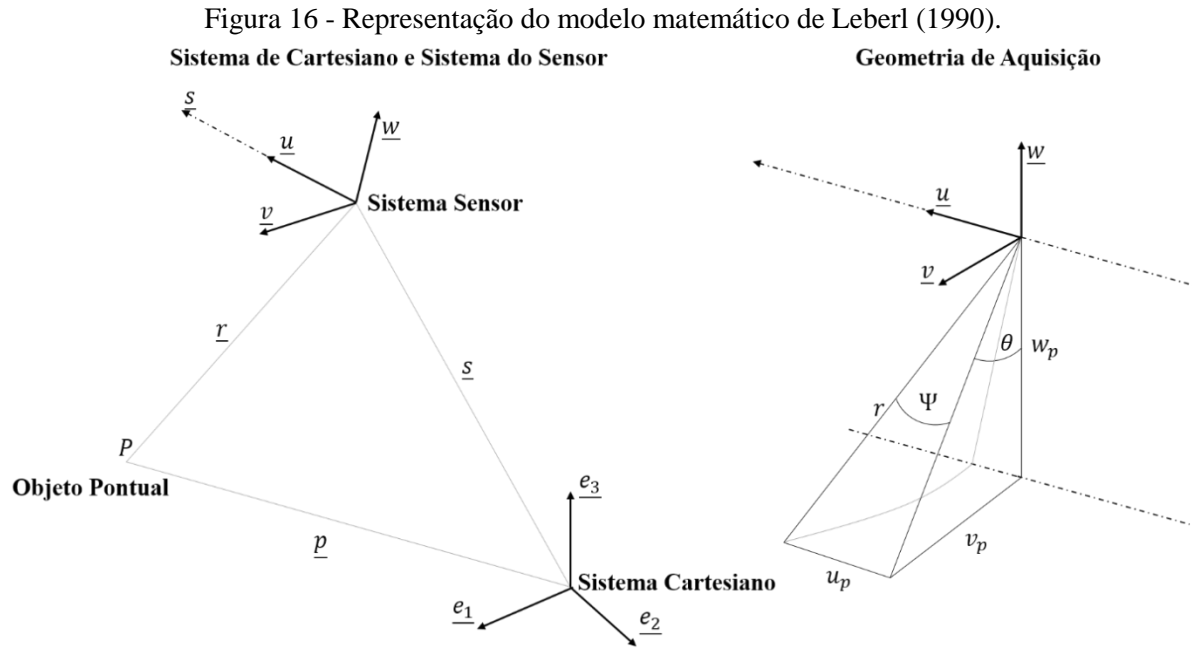
$$a_{23} = \operatorname{sen} \varphi \cdot \operatorname{sen} \kappa \cdot \cos \omega - \cos \kappa \cdot \operatorname{sen} \omega$$

$$a_{31} = \operatorname{sen} \varphi$$

$$a_{32} = \cos \varphi - \operatorname{sen} \omega$$

$$a_{33} = \cos \varphi \cdot \cos \omega$$

O modelo de Leberl (1990) relacionou os elementos do espaço objeto, sistema do sensor e a geometria de aquisição, e serve de base para modelos de orientação radargramétricos associado as equações *Range-Doppler* (Figura 15).



O estéreo par de imagens SAR é capaz de fornecer perspectivas de feições em disparidades ao serem projetadas no alcance inclinado, sendo que o deslocamento entre as projeções de diferentes perspectivas é a medida de paralaxe a qual permite computar a elevação de terreno (TOUTIN; GRAY, 2000). A paralaxe é o deslocamento aparente da projeção de um objeto por efeito de posições distintas de observação. Em observações de plataformas de sensoriamento remoto, objetos com maior altitude apresentam maiores medidas de paralaxe do que objetos de menor altitude, isso pelo fato do objeto de maior altitude estar mais próximo do ponto de observação (sensor) (TOMMASELLI, 2009).

Méric et al. (2009) ratificam que métodos radargramétricos de reconstrução 3D têm como principais indicadores de qualidade para a determinação da elevação do alvo os seguintes parâmetros: i) paralaxe estereoscópica (paralaxe em x), dado pelo somatório dos deslocamentos aparentes em imagens SAR de amplitude e apresentado na forma de disparidades nas projeções de alcance inclinado para objetos homólogos observados em uma tomada a esquerda e direita; e, ii) ângulo de interseção, definido pela interseção entre as linhas de visada das plataformas de observação, estritamente relacionado com a linha de base.

A geometria de aquisição SAR é crítica para constituir pares estereoscópicos e evitar distorções geométricas inerentes ao processo de imageamento (encurtamento de vertente, inversão de relevo e sombreamento), o que repercute consequentemente na restituição do terreno (LEBERL, 1998). Em áreas com grandes movimentações de relevo susceptíveis a distorções geométricas, a restituição tridimensional do terreno deve ocorrer por meio de

diferentes linhas de visada, utilizando pares ascendentes e descendentes (FAYARD et al., 2007; MÉRIC et al., 2009)

A técnica radargramétrica demanda uma configuração ideal entre as posições das linhas de visada dos sensores SAR para se alcançar estimativas precisas de elevação. O parâmetro mandatório desta configuração é a razão entre linha de base e altura da plataforma (B/H), de tal forma que coeficientes entre 0,25 a 2 propiciam um eficiente ajuste entre os pares estereoscópicos (MÉRIC et al., 2009). Para obter uma razão de base e altura aceitável, usa-se pares estereoscópicos com ângulo de interseção a partir de 7 graus, já que ângulos de interseção menores de 7 graus comprometem a estimativa de elevação e mesmo que se utilize pontos de amarração ou pontos de controle de terreno, a solução do modelo radargramétrico é provavelmente inconsistente para o computo da topografia residual (PCI GEOMATICS, 2016).

A aquisição estereoscópica em radar pode ser realizada em duas configurações: i) visadas de mesmo sentido, isto significa que as posições de observação das plataformas em relação a um alvo no terreno estão voltadas para o mesmo lado em órbita ascendente ou descendente; e, ii) visadas de sentidos opostos, em que o alvo no terreno está posicionado entre as plataformas de observação em órbitas ascendente e descendente (TOUTIN, 1999).

Fayard et al. (2007) apresentam um modelo matemático simplificado para calcular a elevação de um alvo na superfície, baseado em linhas de voos paralelas e altitude constante, em adição, esta medição considera a elevação do ponto na projeção de alcance inclinado, a paralaxe estereoscópica absoluta e o ângulo de incidência. Toutin e Gray (2000) apresentam o cômputo aproximado da elevação, dado por um operador “±” dependente da configuração de imageamento estereoscópico, com “+” para visadas de mesmo sentido e “-” para visadas de sentidos opostos, conforme a formulação:

$$h = (p_1 - p_2) / (\cos \theta_2 \pm \cos \theta_1) \quad (24)$$

sendo que:

h : elevação do ponto;

$p_1 - p_2$: paralaxe estereoscópica absoluta;

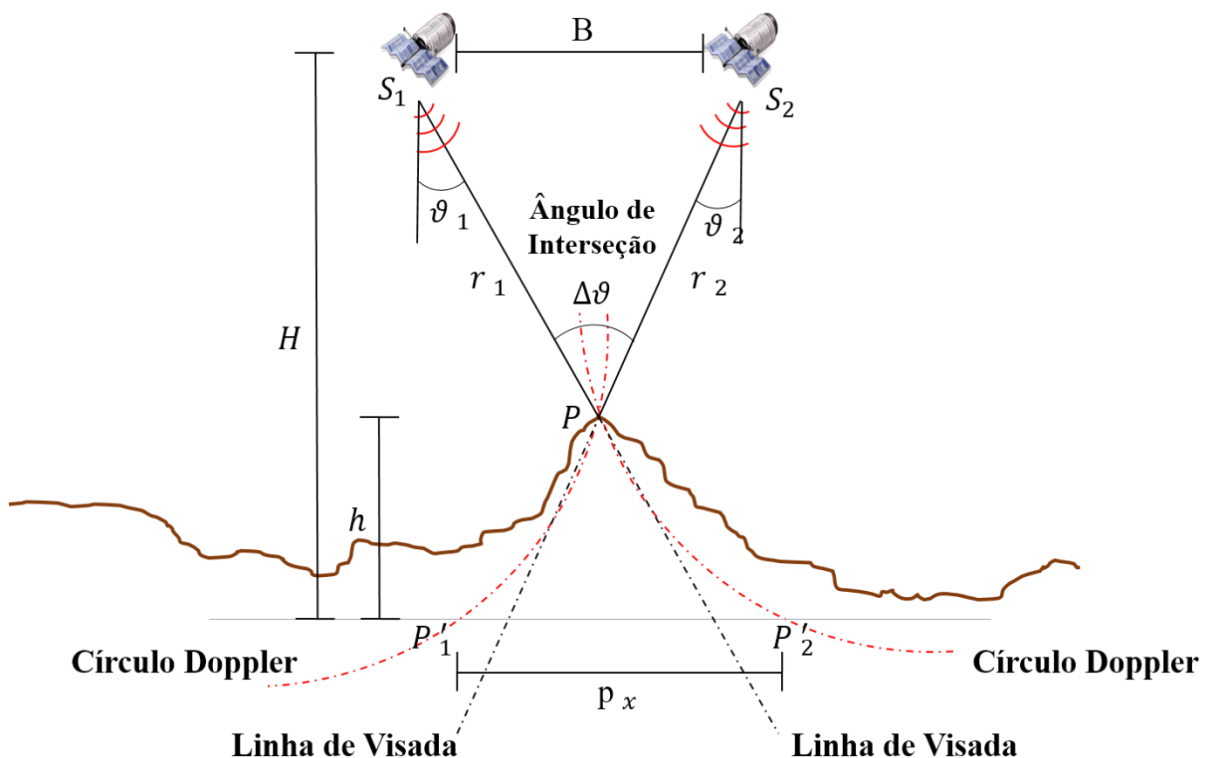
θ : ângulo de incidência.

A correspondência radiométrica e a sensibilidade altimétrica entre pares estereoscópicos de radar são compromissos com escolhas favoráveis para um parâmetro em detrimento do outro no processo de elaboração de MDS, e assim incidem diretamente na acurácia posicional. Deve ocorrer a correspondência radiométrica entre feições no terreno para garantir a identificação de pontos de controle e pontos de amarração, pois ambos são relacionados pelo sinal

retroespalhado e aplicados como soluções fidedignas nos modelos radargramétricos de reconstrução 3D variando em disposição, quantidade e altimetria. A sensibilidade altimétrica é predominantemente estabelecida pelo ângulo de interseção, haja vista que configurações opostas de plataformas SAR definem menor correspondência radiométrica. Por outro lado, configurações de plataformas SAR em mesmo sentido definem maior correspondência radiométrica. Existem contrapontos entre as características do relevo e a condição crítica de ângulo de interseção para aplicar uma geometria de visada que incidirá no modelo radargramétrico para a correspondência de imagens e a reconstrução geométrica tridimensional (MERIC et al., 2011; MÉRIC et al., 2009; PARADELLA et al., 2003, 2005a, 2005b).

A visada em sentidos opostos é adequada a terrenos de baixa altitude e gradiente topográfico suave, para evitar problemas de correspondência radiométrica ou distorções geométricas severas, aliado a pares estéreos com ângulos de incidências íngremes ($\theta < 30^\circ$). Dessa forma, pode haver maior brilho (ausência de sombras) e maior penetrabilidade vertical em alvos de espalhamento volumétrico (Figura 17) (MÉRIC et al., 2009; PARADELLA et al., 2005b). Tomadas estereoscópicas de imagens SAR em sentidos opostos ainda não têm ampla implementação computacional em aplicativos comerciais.

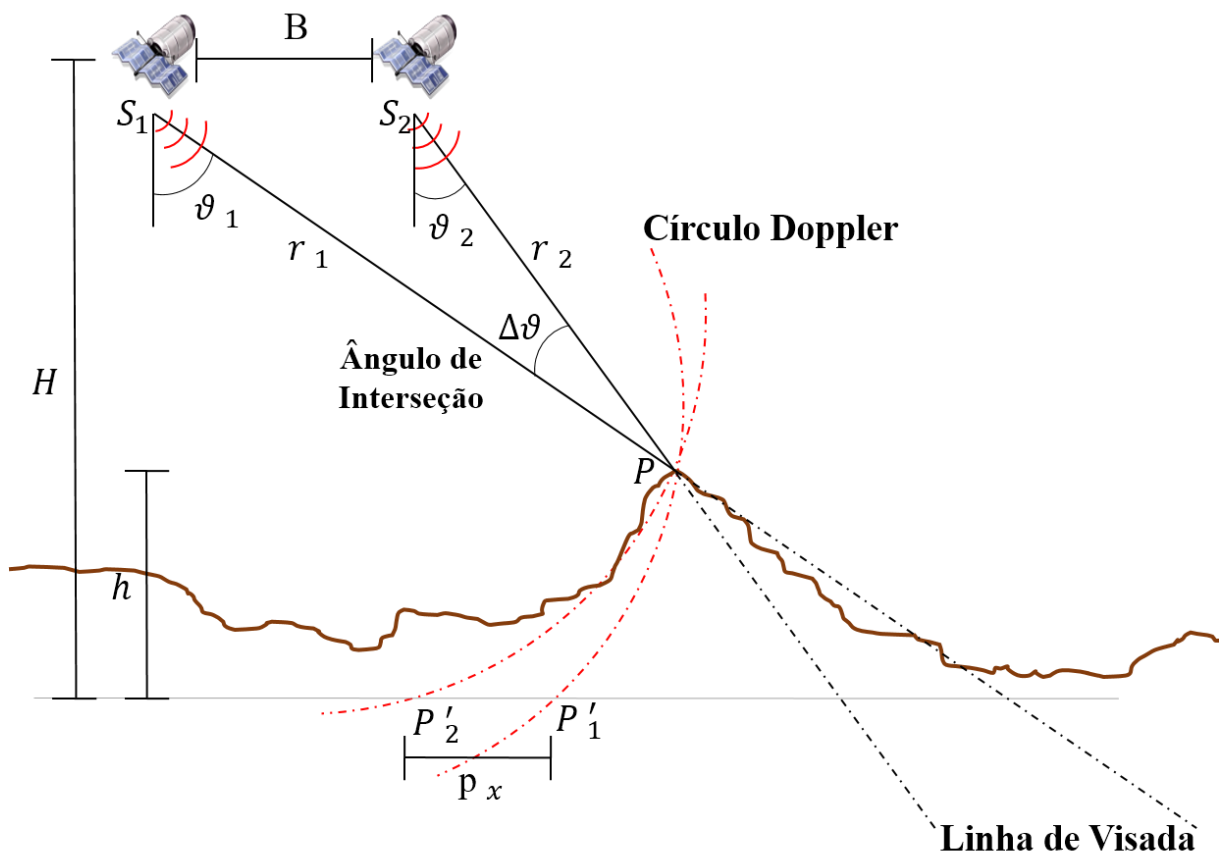
Figura 17 - Geometria de aquisição de estéreos pares radargramétricos em visada de sentidos opostos.



Fonte: Adaptado de Méric et al., 2009; Woodhouse (2006).

A visada de mesmo sentido é adequada em terrenos altos de gradiente topográfico acidentado para melhorar a correlação radiométrica dos pixels em uma única vertente de observação do relevo, aliado a pares estéreo com ângulos de incidências rasantes ($\theta \geq 35^\circ$). Nesta configuração, pode haver menor brilho (presença de sombras), minimização de distorções geométricas e menor penetrabilidade vertical em alvos de espalhamento volumétrico (Figura 17) (MÉRIC et al., 2009; TOUTIN, 2000)

Figura 18 - Geometria de aquisição de estéreo pares radargramétricos em visada de mesmo sentido.



Fonte: Adaptado de Méric et al., 2009; Woodhouse (2006).

3.4 Acurácia Vertical

Dados geoespaciais constituem-se em modelos da superfície terrestre real mapeada os quais abstraem feições/atributos específicos por meio de estimativas, reduções, agrupamentos e/ou predição. Portanto, inerente ao processo de mapeamento está a presença de erros nos estágios de aquisição, tratamento e representação o que propicia diferentes níveis de precisão e acurácia à informação geoespacial elaborada (DEVILLERS; JEANSOULIN, 2010).

A análise de qualidade para dados geoespaciais está relacionada a diversos elementos como linhagem, posicional, atributo, completeza, topologia, semântica, temporal e utilidade (HAKLAY, 2010).

Ao se tratar do critério de acurácia posicional, este pode ser assumido como o grau de condescendência entre as coordenadas de pontos extraídos de um mapa e os mesmos pontos levantados/medidos de uma fonte confiável com erro controlado e conhecido (ASPRS; ASCE, 1994). A acurácia posicional é relevante por atribuir o nível de incerteza no processo de mapeamento o qual deve ser considerado para potencializar ou restringir a análise espacial (CONGALTON; GREEN, 2009).

Wilson (2012) discutiu a acurácia geométrica de produtos cartográficos como consequência da técnica de reconstrução tridimensional, relativa a fotogrametria, radargrametria, interferometria, laser aerotransportado, levantamentos topográficos e interpolação, além de apresentar valores de referência para se obter na acurácia posicional e vertical de MDS (Tabela 2).

Tabela 2 - Acurácia vertical de MDSs obtidos por diferentes técnicas.

Técnicas para Elaboração de MDS	Acurácia Vertical
Observações Topográficas Clássicas	Alta Acurácia
Observações GNSS	1-10 cm
Digitalização de Curvas de Nível	1/3 do intervalo das curvas
Fotogrametria	0,1-1 m
Lidar	0,5-3 m
Interferometria SAR	2,5-20 m
Radargrametria SAR	10-100 m

Fontes: Li; et al (2004); Wilson (2012)

Com o objetivo de estabelecer padrões de qualidade para dados geoespaciais, recorre-se a convenções nacionais e internacionais sobre acurácia posicional. Destaca-se com amplo uso o padrão de qualidade posicional *National Standard for Spatial Data Accuracy* (NSSDA) (FGDC, 1998). No Brasil, as normas de qualidade posicional são determinadas pelo Padrão de

Exatidão Cartográfica (PEC), constituindo-se em um instrumento legal formalizado pelo Decreto 89.817 de 20 de Junho de 1984, que estabelece procedimentos e padrões para a produção cartográfica no território brasileiro, inicialmente, este instrumento foi especificado para cartas impressas (DSG, 2016). Independente da especificação e padrões materializados para a validação de produtos cartográficos é inerente ao processo de mapeamento atender pressupostos.

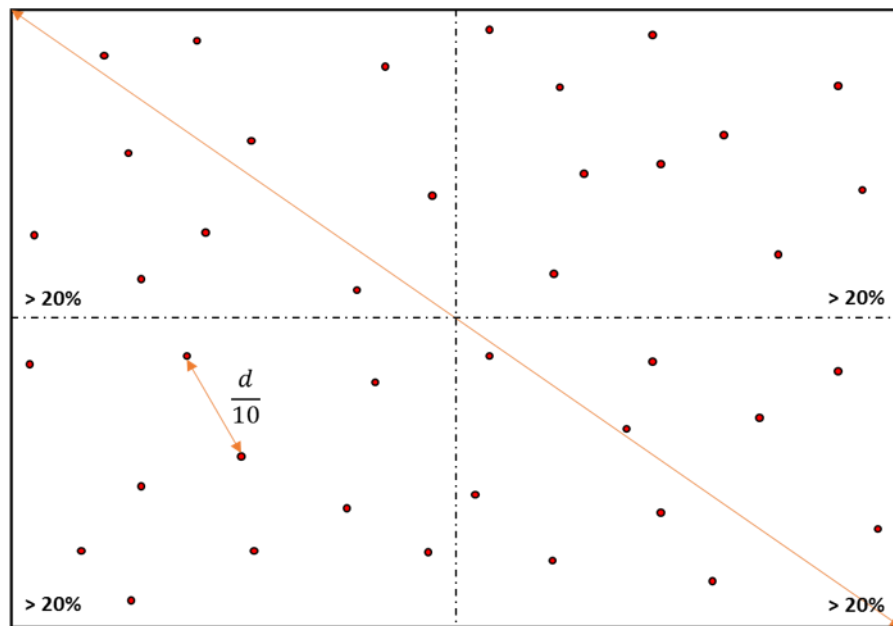
Congalton e Green (2009) ressaltam a necessidade de se verificar pressupostos inerentes ao processo de avaliação de acurácia posicional como: normalidade, linearidade, homocedasticidade, independência, remoção de erros grosseiros e sistemáticos, aleatoriedade e amostragem espacial bem distribuída.

Para tanto, deve se estabelecer procedimentos rigorosos de amostragem em campo afim de garantir:

- i) Independência dos dados: os dados de referência não devem interferir nos processos de mapeamento, dados de pontos de controle devem ser usados separados do conjunto de avaliação;
- ii) Fonte de referência: os dados de referência devem ser de maior acurácia posicional com viabilidade e praticidade. Diversos manuais recomendam que a referência seja três vezes mais acurada que os dados testados (ASPRS, 2015; GALO; CAMARGO, 1994);
- iii) Número de amostras: a aplicação de testes estatísticos com rigor exige um conjunto amostral maior do que 20 pontos. A NSSDA sugere 20 pontos no mínimo, outros padrões tratam a amostragem mínima por cada classe de cobertura do terreno com pontos entre 20 a 30. Se a distribuição da população de erros contém viés é necessário aumentar o tamanho da amostra (FGDC, 1998);
- iv) Identificação das amostras: os pontos de referência devem ser bem definidos na imagem/mapa, portanto, as amostras devem consistir em uma feição de claro reconhecimento na escala cartográfica proposta. Feições formados por ângulos retos em planimetria e estáveis ao longo do tempo são melhor identificáveis e adequadas à avaliação posicional;
- v) Distribuição das amostras: amostras têm por prerrogativa representar amplamente a variabilidade topográfica do mapa/imagem, logo pontos bem distribuídos significam representar todo o conjunto de paisagens. A partir de um conjunto de pontos identificáveis pode-se fazer uma seleção aleatória.

A ASPRS (1990) sugere que a amostragem contemple os quadrantes das imagens com número de pontos superior a 20% do total amostrado, em adição, a distância entre amostras deve ser superior a 1/10 da diagonal principal, assim evita-se autocorrelação espacial no mapa/imagem avaliado (Figura 19).

Figura 19 - Disposição de pontos para avaliação de acurácia posicional segundo ASPRS (1990).



Uma das medidas estatísticas capaz de representar o erro presente em uma análise posicional é o *Root Mean Square Error* (RMSE). Este estimador fornece o erro médio entre coordenadas do mapa/imagem em relação as coordenadas de referência, com a compensação de observar valores positivos e negativos (FGDC, 1998). O RMSE para uma população é dado por:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta e_i)^2}{n}} \quad (25)$$

Sendo Δe_i o erro/discrepância entre as coordenadas de referência e_i e as coordenadas do mapa/imagem e_i^c .

$$\Delta e_i = e_i - e_i^c \quad (26)$$

A análise posicional definida por Galo e Camargo (1994), consistiu em executar testes estatísticos de tendência e precisão para o nível de significância definido pelo PEC, assim os

dados no mapa/imagem são contrapostos aos dados de referência obtidos em campo com erro controlado. A base dos testes estatísticos para acurácia posicional é essencialmente fundamentada nos valores de discrepância médios ($\Delta\bar{e}$) e desvios padrão amostral ($S_{\Delta e}$), expressos por:

$$\begin{cases} \Delta\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta e_i \\ S_{\Delta e} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta e_i - \Delta\bar{e})^2} \end{cases} \quad (27)$$

Para avaliar a existência de tendência entre as discrepâncias nas direções x, y e z é utilizado o teste *t-Student*. Esse teste estatístico verifica se os erros analisados são de característica aleatória, e portanto, pertencem a um conjunto de média igual a zero, ao contrário, na presença de erros grosseiros ou sistemáticos a média se distancia de zero (CONGALTON; GREEN, 2009). Desta forma, calcula-se a estatística t vinculada a um nível de significância e testa-se a hipótese nula (H_0) para rejeição ou aceitação de acordo com:

$$\begin{cases} H_0: \Delta\bar{e} = 0 \\ H_1: \Delta\bar{e} \neq 0 \end{cases} \quad (28)$$

No caso de rejeição da hipótese nula no teste de tendência, provavelmente, existe algum componente influenciando no erro em uma dada direção x, y ou z. Galo e Camargo (1994) consideram que a minimização do efeito de tendência pode ser mitigado por meio da subtração da discrepância média ($\Delta\bar{e}$) em cada observação, removendo a tendência.

Para avaliar se a precisão de um mapa/imagem está equivalente a uma determinada classe e escala cartográfica, é utilizado o teste qui-quadrado, o qual compara a variabilidade do conjunto amostral ($S_{\Delta Z}^2$) testado para com a referência populacional (σ_Z^2). É esperado que o conjunto amostral testado tenha variância das discrepâncias não superior a tolerância da classe e escala cartográfica a qual se enquadra o teste qui-quadrado. Calcula-se a estatística χ^2 vinculada a um nível de significância e testa-se a hipótese nula (H_0) para rejeição ou aceitação de acordo com:

$$\begin{cases} H_0: S_{\Delta Z}^2 = \sigma_Z^2 \\ H_1: S_{\Delta Z}^2 > \sigma_Z^2 \end{cases} \quad (29)$$

O PEC é considerado um indicador de dispersão para erros aleatórios toleráveis, em que 90% dos pontos coletados no produto cartográfico ou 1,6449 do Erro Padrão (EP) precisam ter discrepância igual ou inferior aos valores de coordenadas de referência, levantadas em campo por um método de alta acurácia (BRASIL, 1984). As precisões adotadas para classificar produtos cartográficos digitais no território brasileiro são definidas pelo Padrão de Exatidão Cartográfico para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), o qual tem as precisões ordenadas entre as classes A, B, C e D, para as diferentes escalas (DSG, 2016). O PEC-PCD é resultado de uma atualização do PEC, o qual materializa maior rigor na qualificação de precisão posicional para as recentes tecnologias de mapeamento e é adotado pelas instituições oficiais da cartografia brasileira (PEREIRA; NERO, 2012) (Tabela 3).

Tabela 3 - Padrão de Exatidão Cartográfico para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD).

Planimetria (m)												
PEC-PCD	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000	
	PEC ²	EP ³	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP
A	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70	7,00	4,25	14,00	8,51
B	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00	12,50	7,50	25,00	15,00
C	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00	20,00	12,50	40,00	25,00
D	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00	25,00	15,00	50,00	30,00
Altimetria (m)												
A	0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34	1,35	0,84	2,70	1,67	5,50	3,33
B	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,66	2,50	1,67	5,00	3,33	10,00	6,66
C	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00	6,00	4,00	12,00	8,00
D	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50	7,50	5,00	15,00	10,00
Curvas de Nível - 1/3 da Equidistância (m)												
A	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,67	2,50	1,67	5,00	3,33	10,00	6,67
B	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00	6,00	4,00	12,00	8,00
C	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50	7,350	5,00	15,00	10,00
D	1,00	0,60	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00	20,00	12,00

Fonte: DSG (2016)

² Padrão de Exatidão Cartográfico (PEC) é o valor de referência tolerado para 90% do conjunto amostral.

³ Erro Padrão (EP), é uma medida de dispersão populacional ou amostral dada por $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ ou $\frac{S}{\sqrt{n}}$. Entretanto, o decreto do PEC utiliza o erro padrão como desvio padrão populacional, e estima-o como desvio padrão amostral.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Os conjuntos de dados utilizados no estudo podem ser sumarizados em: i) imagens ópticas multiespectrais de baixa resolução espacial; ii) imagens orbitais de microondas de alta resolução, em banda X, adquiridas para os períodos seco e chuvoso; iii) dados colaterais meteorológicos e tábua de marés referentes as datas e horários de aquisição das imagens; iv) bases cartográficas temáticas e topográficas; e, v) coordenadas x, y e z, e atributos coletados em campo para amostrar os ambientes costeiros por meio de levantamento geodésico de dupla frequência com receptor *Differential Global Navigation Satellite System* (DGNSS), que permitiu obter *Independent Check Points*⁴ (ICP), *Stereo Ground Check Points*⁵ (SGCP) e *Ground Control Points*⁶ (GCP), estes três subconjuntos amostrais foram utilizados na avaliação de acurácia vertical, nos modelos radargramétricos e nos modelos interferométricos, respectivamente (Tabela 4).

Tabela 4 - Características gerais dos dados utilizados no estudo e número de elementos amostrais levantados em campo.

Imagens	Faixa Espectral	Resolução Espacial	Fonte
MODIS	1-7 (620-2155 nm)	500 m	USGS (2015)
MDE/SRTM	C (5,6 cm)	30 m	USGS (2015)
Cosmo-SkyMed	X [3,1 cm]	3 m	©ASI (2016)
TerraSAR-X	X [3,1 cm]	3 m	©DLR (2016)
Dados Temáticos	Descrição	Escala	Fonte
Base Temática	Geologia e Geomorfologia	1:250000	IBGE (2015)
Meteorologia	Chuva, Temperatura e Vento	Diária	INMET (2016)
Oceanografia	Marés e Ciclo Lunar	Horária	DHN (2016)
Dados GNSS	Planície Costeira	Tabuleiro Costeiro	Terraço Fluviomarinho
ICP	59	40	27
GCP	2	4	6
SGCP	12	12	3

⁴ ICP é uma feição definida, para a qual se conhece coordenadas x, y e z. São utilizadas como um conjunto independente para avaliação das imagens, ou seja, não podem ser utilizados nos tratamentos dos dados.

⁵ SGCP é uma feição claramente identificada em duas ou mais imagens da qual são conhecidas as coordenadas x, y e z, porém em cada imagem, ocupa uma linha e coluna diferente, ou seja, é o cruzamento de um ponto de amarração e um ponto de controle.

⁶ GCP é uma feição claramente identificada em uma imagem bruta em que se conhece as coordenadas x, y e z.

4.1.1 Imagens Ópticas

Os dados ópticos para a caracterização espectral foram provenientes do produto MOD09, gerado pelas imagens MODIS em nível L3, estes obtidos para o perfil temporal de 2000 a 2014. O MOD09 é composto por medições de reflectância de superfície agrupadas em um período de 8 dias, com elemento de resolução no terreno de 500 m, e radiometricamente calibrado para efeitos da dispersão e absorção atmosféricos (LP DAAC, 2015a). Os dados MODIS foram obtidos em formato HDF, referenciados ao datum WGS-84, projeção sinusoidal e foram lidos, mosacaidos e reprojitados para UTM 22 Sul, usando o aplicativo MRT Tool (LP DAAC, 2015b). As principais características do produto reflectância de superfície (MOD09) são apresentadas na Tabela 5:

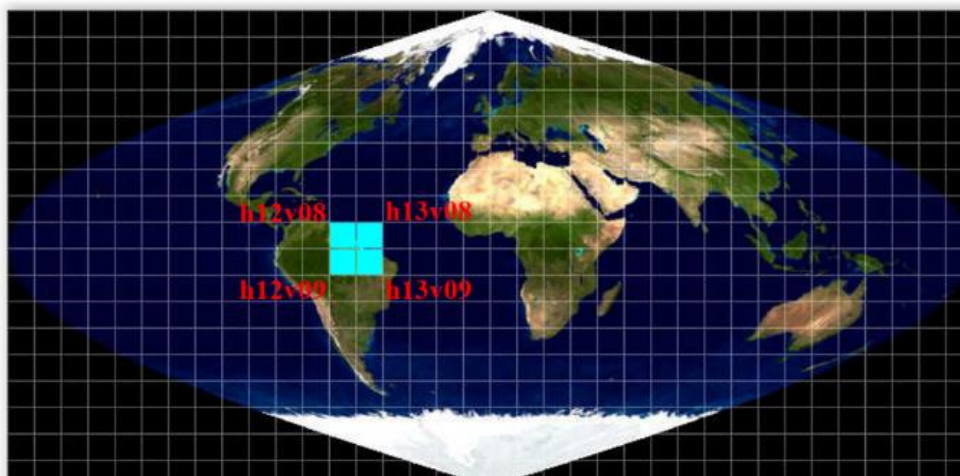
Tabela 5 - Principais características do sensor MODIS produto MOD09.

Programa	<i>Earth Observing System</i>	
Plataforma	Terra (EOS AM-1)	Aqua (EOS PM-1)
Lançamento	18/12/1999	4/05/2002
Órbita	Descendente/10:30	Ascendente/13:30
	Sol-Síncrona	
	705 km	
Faixa Imageada	2330 km/cruzado ao trajeto e 10 km/ao longo do trajeto	
Sensor/Produto	MODIS/Reflectância de Superfície	
Bandas Espectrais (nm)	1	620-670
	2	841-876
	3	459-479
	4	545-565
	5	1230-1250
	6	1628-1652
	7	2105-2155
Resolução Espacial	1000 m; 500 m; 250 m	
Acurácia Geométrica	Cruzado ao trajeto: 5% (1000 m); 10% (500 m) e 5% (250 m)	
Acurácia Radiométrica	5% ($\lambda < 3\mu\text{m}$); 2% ($\lambda > 3\mu\text{m}$)	
Quantização/Formato/Nível	16 bits/Fator de Escala 10000/HDF-EOS/L3	
Revisita	Latitude $\leq 30^\circ\text{N}$ /1 dia; Latitude $> 30^\circ\text{N}$ /2 dias	
Cena	10° x 10°	
Estimativa de Reflectância	Período de 8 dias	
Referência Espacial	Projeção Sinusoidal/WGS-84	

Fonte: Justice et al., (2002) e LP DAAC (2015a)

Para cobrir a ZCA, as quadrículas h12v08, h12v09, h13v08 e h13v09 foram usadas, sendo que, uma quadrícula abrange uma faixa de largura de 10°. A área coberta está localizada na porção norte da América do Sul perto do Equador (Figura 20).

Figura 20 - Quadrículas do MODIS utilizadas para cobrir a ZCA na articulação sinusoidal.



4.1.2 Dados SAR

As missões CSK e TSX consistem em constelações de satélite de observação terrestre, atuam na alta frequência do espectro das microondas, executam feixes em modo Spotlight, Stripmap e ScanSAR, além de executar arranjo Tandem. Ambos são oriundos de iniciativa público privada com finalidades experimentais, científicas, civis e militares. As principais características desses sistemas estão dispostas na Tabela 6.

Tabela 6 - Características dos sistemas orbitais CSK e TSX.

Agência Espacial	ASI	DLR
Plataforma	CSK 1, 2, 3 e 4	TSX 1 e TanDEM-X
Operação	08/06/2007 - Atual	15/06/2007 - Atual
Órbita	Sol-síncrona/619 km	Sol-síncrona/514 km
Faixa Espectral	Banda X (3,1 cm; 9,60 GHz)	Banda X (3,1 cm; 9,65 GHz)
Passagem Ascendente	6:00	18:00
Revisita	1 dia	11 dias
Resolução	1, 3; 15 e 30 m	1, 3, 16 m

Fonte: ASI (2016a) e DLR (2013)

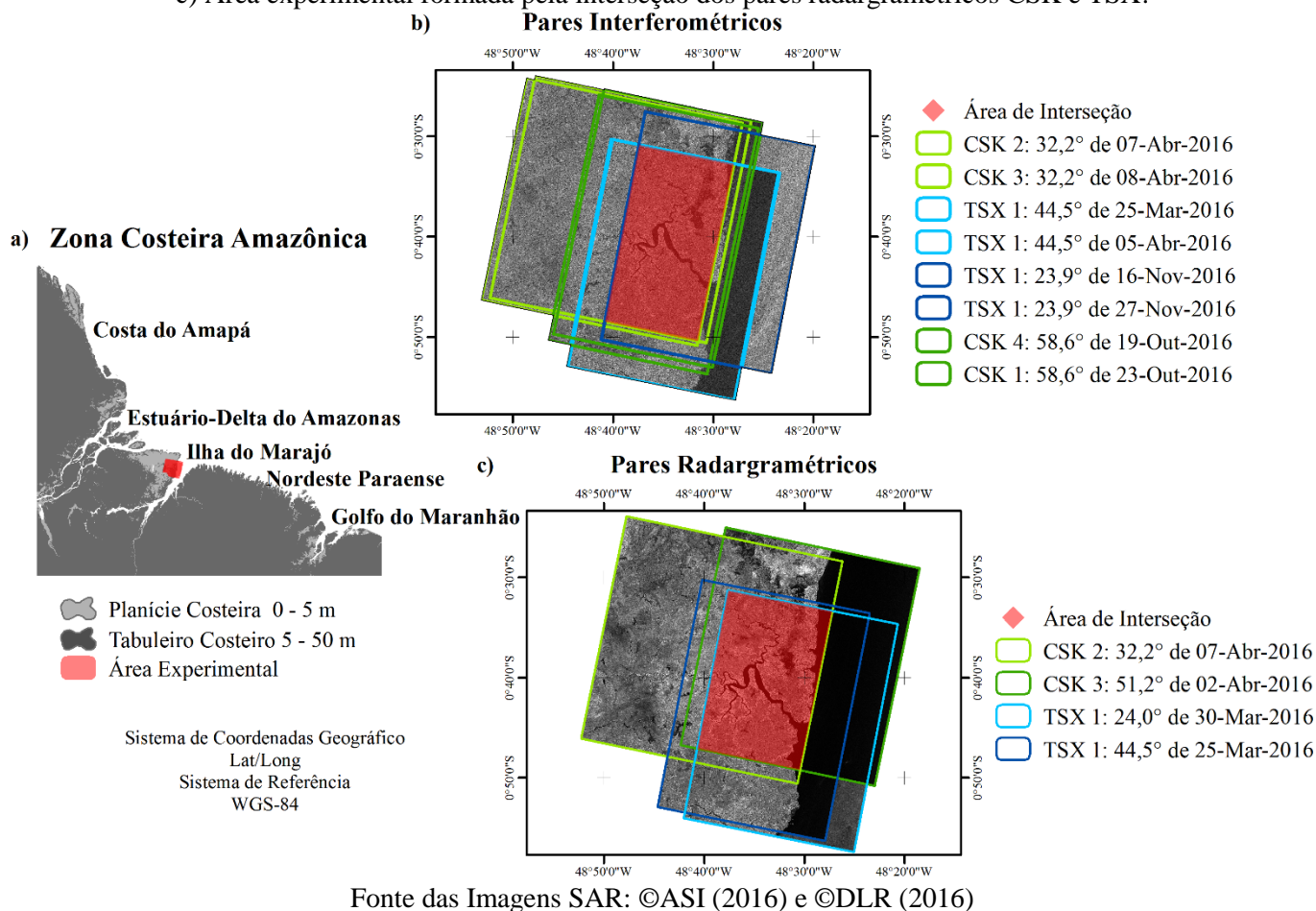
As fontes primárias de dados de microondas deste estudo incluem imagens SAR obtidas pelas plataformas Cosmo-SkyMed (CSK) e TerraSAR-X (TSX), que operam na faixa espectral da banda X (comprimento de onda de 3,1 cm), órbita descendente, visada à direita na direção azimutal $\pm 281^\circ$ (WNW), modo de imageamento Stripmap e nível de processamento *Single Look Complex* (SLC), com calibração interna da radiometria. Os dados SAR possuem metadados completos incluídos e polarização horizontal na emissão e recepção (HH). Os conjuntos de dados CSK e TSX foram fornecidos pela Agência Espacial Italiana (ASI) e pelo

Centro Aeroespacial Alemão (DLR), mediante submissão e aprovação de propostas científicas, projetos 201 e COA2686, respectivamente.

O CSK e TSX permitem medições de alvos em alta resolução amostradas no solo em SLC a partir de 3 metros para detecção nominal, revisita interferométrica melhor que 12 dias e interação com alvo baseado no espalhamento superficial com alta sensibilidade para rugosidade e textura, de acordo com o comprimento do senoide. A precisão prévia de geolocalização do CSK é de 15 m para produtos ortorretificados usando observações de campo, entretanto, testes planimétricos recentes demonstram erro posicional na ordem de 11,2 m (ASI, 2016b). O TSX tem a precisão de geolocalização melhorada em função da determinação de órbitas precisas por meio de GNSS, em que o nível de aplicação científica atinge 1 metro de erro, no entanto, existem efeitos de fontes de erro adicionais como MDE e a variação do ângulo de incidência usado no processo de geocodificação, que implicam em distorções geométricas de acordo com as condições de aquisição SAR (DLR, 2013). O uso de dados SAR em alta frequência implica em desvantagens como menor penetrabilidade em solos, vegetação e gelo, demanda por tratamento do efeito *speckle*, presença indesejável de chuvas e nuvens densas, e maior susceptibilidade para ruídos causados na troposfera.

Ao considerar o setor costeiro mais dinâmico, este comprovado no experimento de variações de linha de costa na ZCA, cenas CSK e TSX foram adquiridas em compromisso da geometria de aquisição SAR para elaborar MDS em múltipla passagem de revisita única. De fato, obteve-se as sobreposições entre as cenas para delimitar uma área experimental para interferometria e radargrametria. Esta área experimental perfaz 30 km de comprimento por 20 km de largura produzida pela interseção de 8 cenas SAR de aquisições interferométricas e 4 cenas SAR de aquisições radargramétricas. As aquisições interferométricas ocorreram durante as estações chuvosa e seca com passagem descendente e ângulo de incidência variando de 24° a 59°. As aquisições radargramétricas ocorreram durante a estação chuvosa com passagem descendente e ângulo de incidência variando de 24° a 51°. A localização dos pares interferométricos e pares radargramétricos constam na Figura 21.

Figura 21 - a) Zona Costeira Amazônica com os principais compartimentos costeiros e as unidades de relevo básicas. b) Área experimental formada pela interseção dos pares interferométricos CSK e TSX. c) Área experimental formada pela interseção dos pares radargramétricos CSK e TSX.



As condições físicas semelhantes são uma premissa para ambientes costeiros, porque estes têm grandes efeitos em escalas espaciais grandes (1-10 metros) e escalas temporais curtas (horas-dias) (WANG, 2010). Desta forma, foi necessário explorar possibilidades de configurações SAR em incidências íngremes e rasantes durante as estações chuvosa e seca.

Adquiriu-se dois pares interferométricos para cada estação, seca e chuvosa, sendo que as condições ambientais foram descritas para meteorologia, maré e ciclo lunar durante as passagens CSK e TSX, as quais são fundamentais para análise e entendimento dos dados e os produtos cartográficos derivados (Tabela 7) (DHN, 2016; INMET, 2016).

Tabela 7 - Características dos pares interferométricos e as principais variáveis físicas.

Pares Interferométricos CSK	CSK 2 ¹	CSK 3 ¹	CSK 4 ¹	CSK 1 ¹
Modo/Produto/Nível	Stripmap/HIMAGE/SLC			
Órbita/Visada	Descendente/Direita			
Ângulo de Incidência (°)	30,7 - 33,7	30,7 - 33,7	58,0 - 59,1	58,0 - 59,1
Resolução Espacial (m)	2,8 x 2,3	2,8 x 2,3	2,7 x 2,6	2,7 x 2,6
Área da Cena (km)	41,7 x 40,9	41,7 x 40,9	46,1 x 30,1	46,1 x 30,1
Data	07-Apr-2016	08-Apr-2016	19-Out-2016	23-Out-2016
Hora Local	17:48	17:48	17:29	17:29
Chuva 5 dias (mm/dia)	9,8	13,7	2,5	0,0
Temperatura (°C)	26,4	26,0	28,4	28,9
Vento(m.s ⁻¹)	1,2	0,96	2,7	3,8
Maré (m)	0,17	0,18	1,52	3,00
Ciclo Lunar (%)	0,0	2,5	86,4	45,5
Pares Interferométricos TSX	TSX 1 ²	TSX 1 ²	TSX 1 ²	TSX 1 ²
Modo/Produto/Nível	Stripmap/SLC			
Órbita/Visada	Descendente/Direita			
Ângulo de Incidência (°)	43,4 - 45,5	43,4 - 45,5	22,3 - 25,6	22,3 - 25,6
Resolução Espacial (m)	2,5 x 3,3	2,5 x 3,3	2,9 x 3,3	2,9 x 3,3
Área da Cena (km)	42,6 x 31,6	42,6 x 31,6	42,7 x 32,1	42,7 x 32,1
Data	25-Mar-2016	05-Apr-2016	16-Nov-2016	27-Nov-2016
Hora Local	05:58	05:58	06:06	06:06
Chuva 5 dias (mm/dia)	20,3	34,1	0,1	0,0
Temperatura (°C)	28,0	27,8	28,9	29,0
Vento(m.s ⁻¹)	2,2	2,04	3,5	3,5
Maré (m)	0,48	1,84	0,27	1,53
Ciclo Lunar (%)	97,2	7,29	95,8	4,6

Fonte: ¹©ASI (2016); ²©DLR (2016)

Adquiriu-se dois pares radargramétricos de mesmo sentido durante a estação chuvosa. As condições ambientais foram descritas para meteorologia, maré e ciclo lunar durante as passagens CSK e TSX (Tabela 8) (DHN, 2016; INMET, 2016).

Tabela 8 - Características dos pares radargramétricos e as principais variáveis físicas.

Pares Radargramétricos	CSK 3 ¹	CSK 2 ¹	TSX 1 ²	
Modo/Produto/Nível	Stripmap/HIMAGE/SLC		Stripmap/SLC	
Órbita/Visada	Descendente/Direita		Descendente/Direita	
Ângulo de Incidência (°)	50,3 - 52,0	30,7 - 33,7	43,4 - 45,5	22,3 - 25,6
Resolução Espacial (m)	2,8 x 2,7	2,8 x 2,3	2,5 x 3,3	3,3 x 2,9 m
Área da Cena (km)	40,8 x 36,7	41,7 x 40,9	42,6 x 31,6	42,7 x 32,1
Data	02-Apr-2016	07-Apr-2016	25-Mar-2016	30-Mar-2016
Hora Local	17:36	17:48	05:58	06:06
Chuva 5 dias (mm/dia)	60,8	9,8	20,3	42,7
Temperatura (°C)	24,8	26,4	28,0	27,1
Vento(m.s ⁻¹)	1,1	1,2	2,2	1,5
Maré (m)	3,01	0,17	0,48	1,51
Ciclo Lunar (%)	28,5	0,0	97,2	63,7

Fonte: ¹©ASI (2016); ²©DLR (2016)

A aquisição radargramétrica se fez apenas no período chuvoso, para que o experimento ocorresse em condições adversas de precipitação. Assim, o desempenho de modelos radargramétricos é investigado em um momento em que dados ópticos estão impossibilitados de ser adquiridos pela alta nebulosidade, e até mesmo, a banda X que dentre as bandas do espectro das microondas sofre maiores efeitos no sinal por chuvas e nuvens carregadas, ocorrendo até oclusões em amplitude.

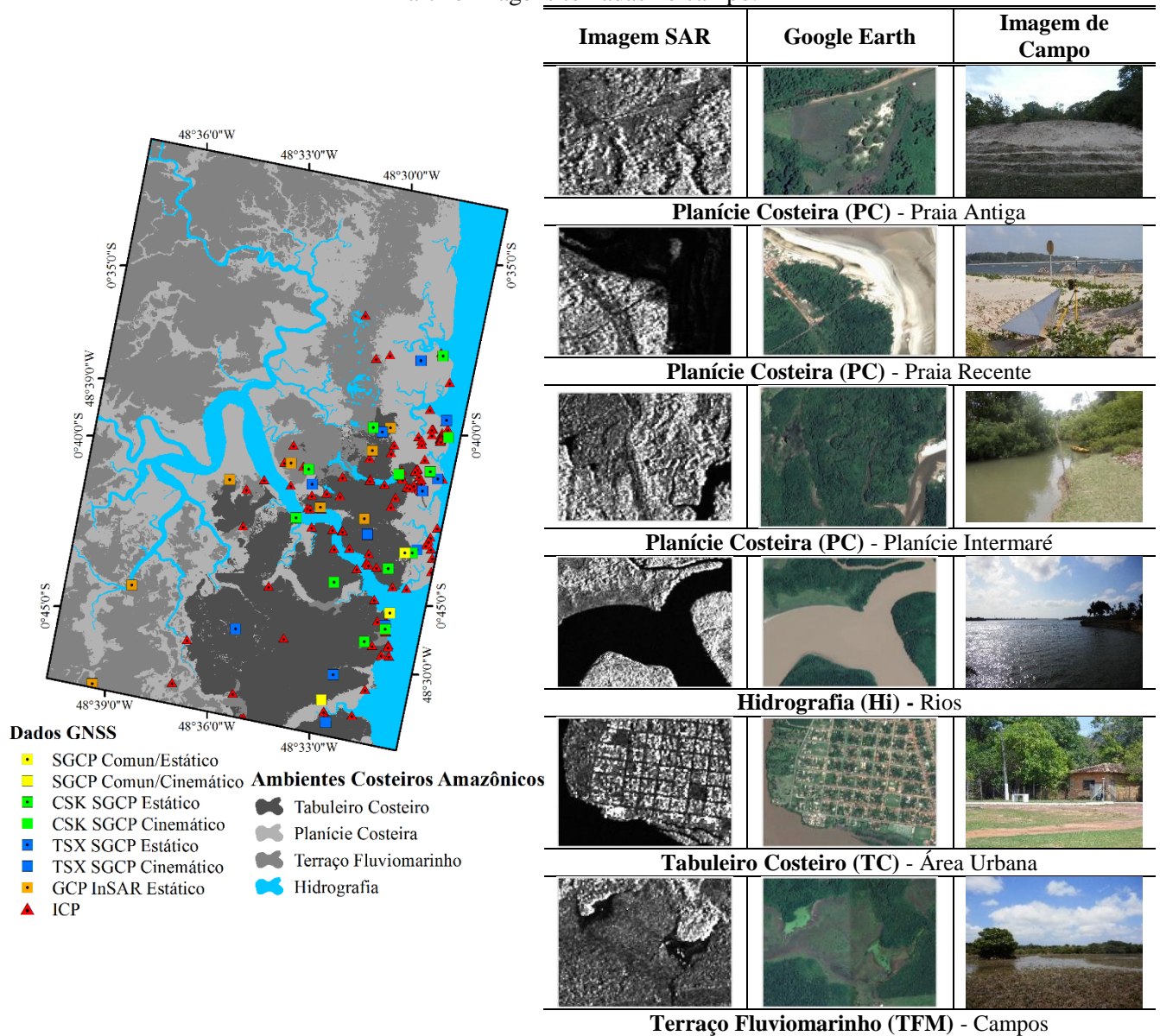
4.1.3 Dados Levantados em Campo

Os dados auxiliares foram as coordenadas geográficas x, y e z, observadas com receptor GNSS de dupla frequência, o qual tem erro controlado na ordem de centímetros sob a superfície topográfica. Duas campanhas de campo foram realizadas durante a estação seca, estas realizadas entre 08 e 12 de outubro de 2015 e 12 a 16 de outubro de 2016, assim, foram obtidas 165 observações GNSS. As observações GNSS foram tratadas por pós-processamento utilizando o modo estático e cinemático. Para o levantamento, 26 bases de recepção de 4 horas, 110 observações estáticas de 30 minutos de recepção e 55 observações cinemáticas de 15 segundos de recepção foram coletados em áreas de dossel florestal aberto. Os dados pós-processados do GNSS utilizaram as constelações GPS e GLONASS, com órbitas precisas, estas foram fixadas com três estações de monitoramento contínuo pertencentes ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) e referenciadas ao datum WGS-84 e altura ortométrica baseada no modelo geoide MAPGEO2010. Desse modo, a precisão foi melhor do que 5,5 cm na planimetria e 10,9 cm na altimetria.

O levantamento GNSS forneceu coordenadas de referência precisas para os MDSs radargramétricos CSK e TSX em ambientes costeiros amazônicos que foram usados da seguinte forma: i) 12 *Ground Control Points* (GCP) necessários no processamento interferométrico para as etapas de refinamento orbital, interferograma em fase plana e interferograma desdobrado; ii) 27 *Stereo Ground Control Points* (SGCP) utilizados nos modelos radargramétricos para identificar claramente posições no terreno e no par estereoscópico, os quais permitem resolver as equações de colinearidade com a relação entre coordenadas geográficas bem conhecidas e linhas e colunas da imagem SAR; e, iii) 126 *Independent Check Points* (ICP), este é o conjunto de amostras sem viés que seguem os pressupostos de aleatoriedade, independência, boa distribuição espacial com erro três vezes mais preciso do que os dados a serem testados nos modelos interferométricos e radargramétricos (CONGALTON; GREEN, 2009; GALO;

CAMARGO, 1994). Os GCPs, SGCPs e ICPs levantados em campo para os ambientes costeiros amazônicos são apresentados na Figura 22.

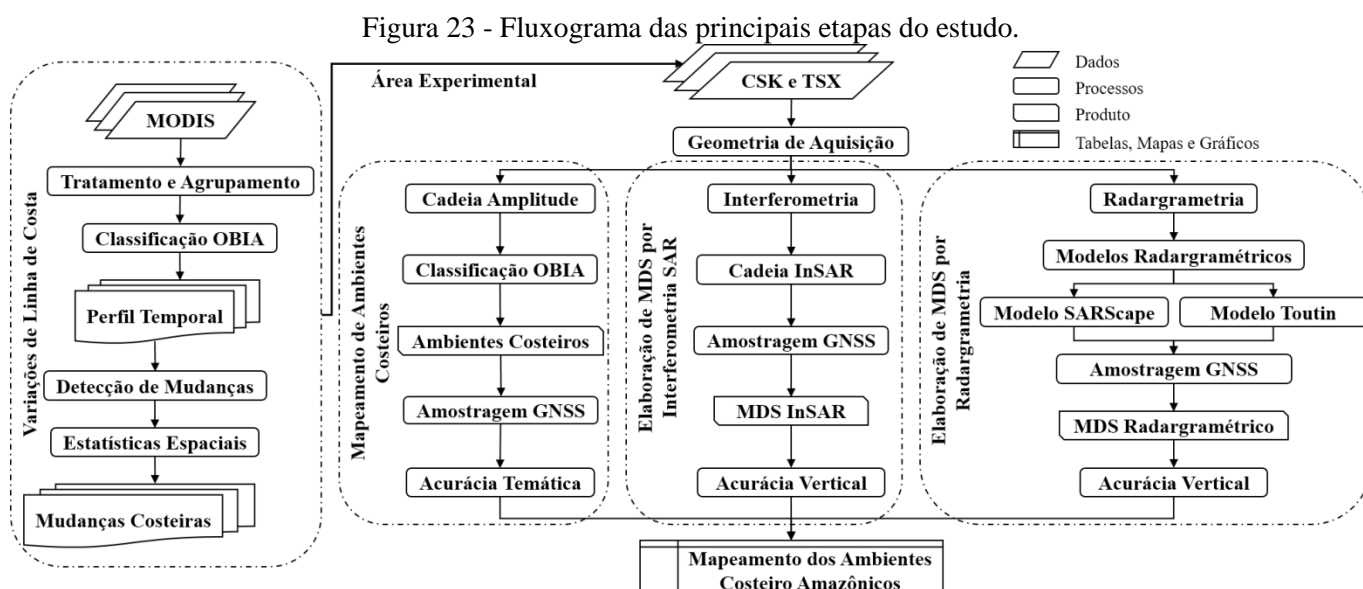
Figura 22 - Mapa dos ambientes costeiros amazônicos mostrando a distribuição espacial das medições GNSS e respectivas representações para com as imagens CSK e TSX, imagens ópticas do Google Earth e imagens tomadas no campo.



Fonte: GUIMARÃES (2011b)

4.2 Desenvolvimento Metodológico Geral

Os procedimentos metodológicos deste estudo correspondem a quatro experimentos na ZCA que são análise de variações de linha de costa, elaboração de MDS por interferometria e radargrametria. As principais etapas podem ser sintetizadas em: i) delineamento da área experimental por meio de análise de variação de linha de costa em perfil temporal de detecção de mudanças (FRANÇA; SOUZA-FILHO, 2003; LU et al., 2004; SOUZA FILHO et al., 2006); ii) classificação por análise de imagens orientada a objetos (OBIA) para mapear os ambientes costeiros (BLASCHKE, 2010); iii) aplicação de técnicas estatísticas para discriminação dos ambientes costeiros e avaliação dos mapas temáticos (CONGALTON; GREEN, 2009; JOHNSON; WICHERN, 2007); iv) cadeia de processamento SAR para elaboração de MDS por interferometria; vi) cadeia de processamento SAR para elaboração de MDS por radargrametria (FAYARD et al., 2007; FERRETTI et al., 2007; MÉRIC et al., 2009; PASQUALI et al., 2012; PCI GEOMATICS, 2016; SARMAP, 2016a; TOUTIN; CHENIER, 2009); e, v) Avaliação de acurácia vertical dos MDS interferométricos e radargramétricos (CONGALTON; GREEN, 2009; GALO; CAMARGO, 1994). Os principais procedimentos desta pesquisa estão na Figura 23:



5. EXPERIMENTOS

5.1 Variações de Linha de Costa

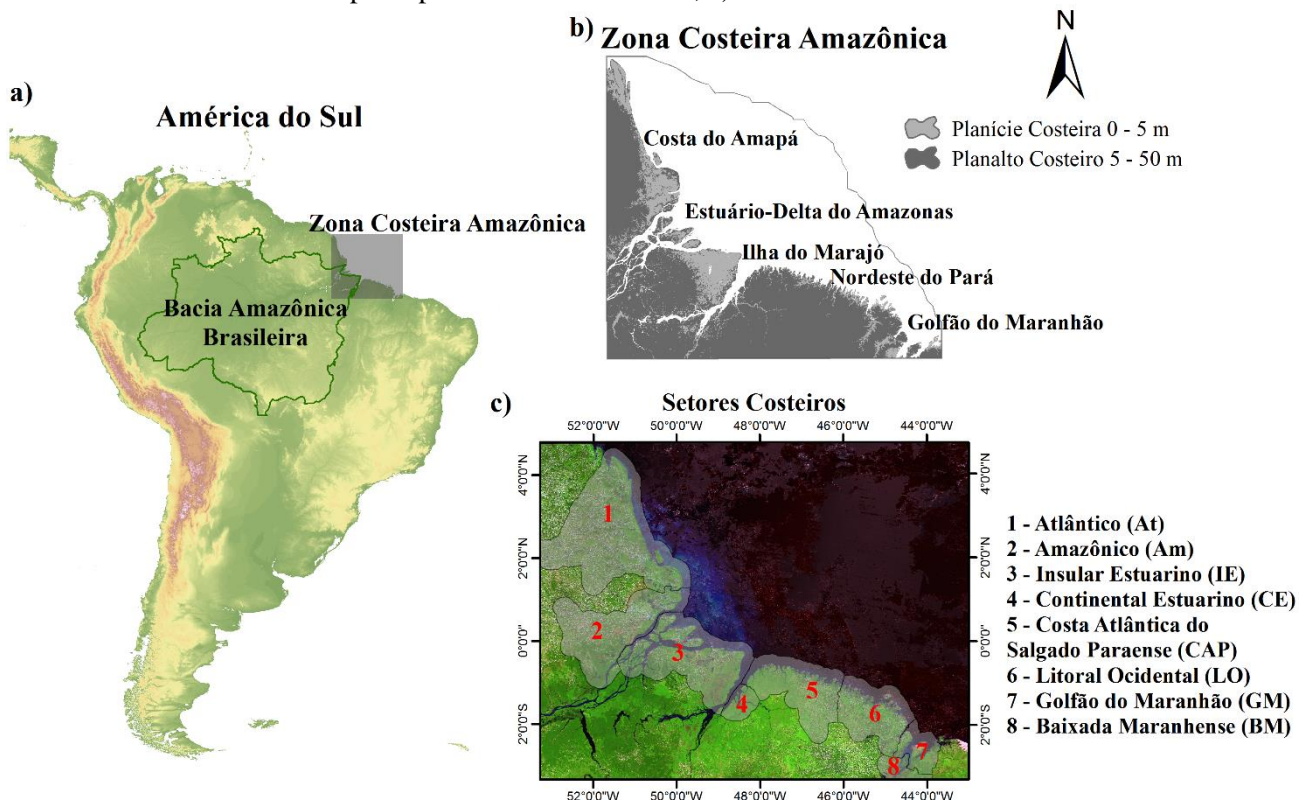
5.1.1 Objetivo

Este experimento contribuiu para nos estudos da ZCA em identificar e quantificar os processos de erosão e acreção, de modo que se determinou o setor costeiro de maior dinâmica em um perfil temporal de 15 anos. Além disso, foi caracterizado e discriminado as feições de erosão e acreção por meio da resposta e índices espectrais provenientes do produto de reflectância de superfície do sensor MODIS.

5.1.2 Área de Estudo

A ZCA foi analisada utilizando a compartimentação física de setores costeiros elaborada por Zamboni e Nicolodi (2008). Desta forma, a costa norte está dividida em 8 setores, conforme apresentado no mapa de localização da área de estudo do experimento I (Figura 24).

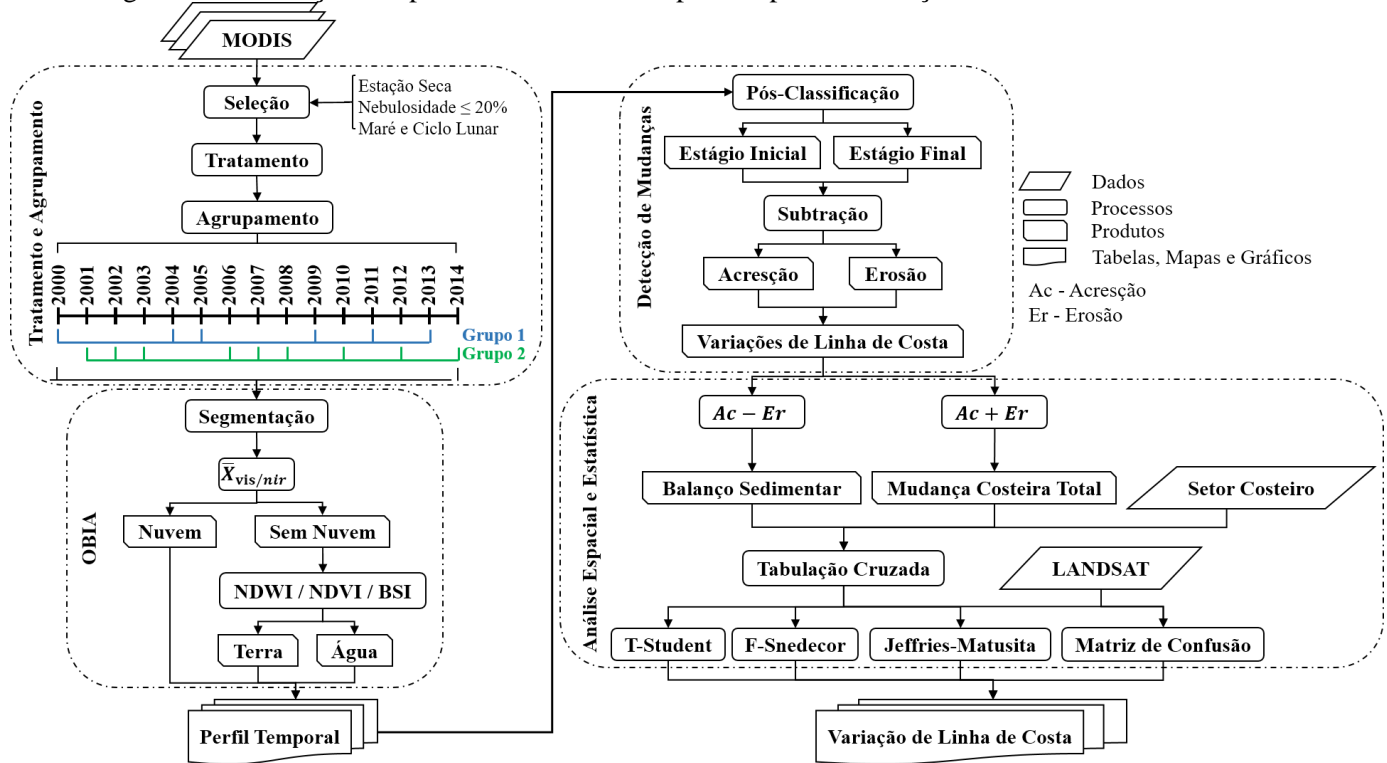
Figura 24 - a) Mapa de localização do experimento I com ZCA no território brasileiro; b) regiões da costa norte e principais unidades de relevo; c) setores costeiros localizados na ZCA.



5.1.3 Método

Para extrair informações sobre variações de linha de costa na ZCA por meio de uma série decadal de dados MODIS, optou-se pela seguinte abordagem: i) tratamento do produto MOD09 e agrupamento estatístico das cenas; ii) classificação por Análise de Imagens Orientada a Objetos (*Object-Based Image Analysis* - OBIA) para mapear as feições costeiras; iii) detecção de mudanças para delinear feições de erosão e acresção; iv) análise espacial e estatística para quantificar e avaliar mudanças significativas nos setores costeiros. Os procedimentos adotados são apresentados na Figura 25:

Figura 25 - Descrição dos procedimentos usados para mapear as variações de linha de costa na ZCA.



5.1.3.1 Tratamento e Agrupamento

Para detectar variações de linha de costa em ambientes costeiros dominados por marés moderadas a altas, foram listados alguns critérios para aquisição de imagens, tais como: i) ser da estação seca, supondo que a descarga de água é mínima na foz do Rio Amazonas; ii) as imagens devem ser geocodificadas e corrigidas do efeito da atmosfera, com cobertura de nuvem inferior a 20% disponibilizadas livremente pela USGS (2015); e, iii) observar as tábuas de marés e condições lunares relacionadas às imagens de aquisição de 8 dias do MODIS, usando

uma estação de referência da DHN (2016). Levando em conta que não há controle sob em que condições oceanográficas e meteorológicas, o dado MODIS é adquirido no horário de passagem no Equador, foi necessário agrupar estatisticamente as cenas baseado nos atributos do dia juliano, a condição das marés e aos ciclos lunares. As cenas MODIS foram agrupadas em dois conjuntos por meio da distância euclidiana que é baseada na raiz quadrada do somatório das diferenças ao quadrado (JOHNSON; WICHERN, 2007) (Tabela 9).

Tabela 9 - Características relacionadas aos dados MODIS.

Produto/Ano	Aquisição Dia Juliano	Maré (m) ⁷	Fase Lunar Cheia (%) ⁸	Cobertura de Nuvens (%)	Distância Euclidiana	Grupo
MOD09A1/2000	153/2000	3,93	Sizígia/1,75	6,01	90,65	1
	160/2000	1,05	Quadratura/42,34			
MOD09A1/2001	209/2001	2,11	Quadratura/60,78	1,88	40,05	2
	216/2001	2,30	Sizígia/99,96			
MOD09A1/2002	177/2002	2,10	Sizígia/97,27	7,90	59,33	2
	184/2002	2,11	Quadratura/43,30			
MOD09A1/2003	193/2003	3,67	Sizígia/97,47	7,46	60,30	2
	200/2003	0,77	Quadratura/67,64			
MOD09A1/2004	233/2004	0,47	Sizígia/19,38	8,47	62,46	1
	240/2004	3,47	Sizígia/90,39			
MOD09A1/2005	208/2005	1,65	Quadratura/46,87	5,39	60,24	1
	216/2005	2,51	Sizígia/0,44			
MOD09A1/2006	217/2006	2,88	Sizígia/79,67	4,02	41,81	2
	224/2006	0,76	Sizígia/87,27			
MOD09A1/2007	209/2007	3,00	Sizígia/98,99	4,79	45,64	2
	216/2007	0,40	Quadratura/66,36			
MOD09A1/2008	193/2008	2,26	Quadratura/62,09	4,90	43,60	2
	200/2008	2,29	Sizígia/99,99			
MOD09A1/2009	201/2009	3,54	Sizígia/4,27	5,00	56,29	1
	208/2009	0,55	Quadratura/34,72			
MOD09A1/2010	209/2010	1,42	Sizígia/94,88	10,29	46,74	2
	216/2010	2,15	Quadratura/37,52			
MOD09A1/2011	209/2011	3,26	Sizígia/6,66	3,64	58,30	1
	216/2011	0,24	Quadratura/27,40			
MOD09A1/2012	209/2012	1,98	Quadratura/62,10	6,46	39,60	2
	216/2012	2,31	Sizígia/97,89			
MOD09A1/2013	209/2013	0,65	Quadratura/63,14	5,92	55,43	1
	216/2013	3,37	Sizígia/5,61			
MOD09A1/2014	185/2014	1,16	Quadratura/39,68	8,91	49,09	2
	192/2014	3,64	Sizígia/98,39			

⁷ Altura da maré observada no horário de passagem do sensor MODIS registrada pela tábua de marés da estação de Ponta do Céu no estado do Amapá, coordenadas geográficas 0°45,6' N e 50°06,8' S (DHN, 2016).

⁸ A fase lunar foi classificada como período de sizígia e quadratura. O período de sizígia corresponde as luas nova (0%) e cheia (100%) na qual as forças da lua e sol somam-se no efeito gravitacional sobre a maré, e, o período de quadratura corresponde as luas crescente e minguante com menores efeitos na amplitude de maré.

5.1.3.2 Mapeamento de Linha de Costa

A linha de costa atual pode ser representada pela linha de preamar média (*Mean High Water Line* - MHWL) durante a maré de sizígia e precisamente adquirida por um medidor de maré. O MHWL também pode ser medido por geoindicadores, conforme relatado por França e Souza-Filho (2003), Santos (2006) e Souza Filho et al. (2006), sendo úteis para mapear as variações de linha de costa, recorrentes em feições de manguezais, barras de areia, canais de marés, deltas ou falésias ativas considerando retração ou deposição de sedimentos.

A classificação OBIA foi realizada para mapear objetos como terra, água e nuvem, e para isso foram utilizadas a segmentação multiresolução e regras por atribuição de limiares. As classes foram definidas em uma cadeia de processo hierárquica com regras específicas e únicas para conjuntos de dados baseados em atributos provenientes de índices espectrais, como a média do visível e do infravermelho próximo ($\bar{X}_{\text{vis/nir}}$), *Enhanced Normalized Difference Water Index* ($NDWI_e$), *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Bare Soil Index* (BSI).

O primeiro índice é uma média entre as bandas do visível (VIS) e infravermelho próximo (NIR) o qual definiu os objetos segmentados como classes de nuvem e não nuvem. É esperada uma alta reflectância espectral média para nuvens de baixo nível formadas por gotículas de água (TAPAKIS; CHARALAMBIDES, 2013).

$$VIS + NIR = \frac{Azul + Verde + Vermelho + Infravermelho \text{ Próximo}}{4} \quad (30)$$

O segundo índice espectral é *Normalized Difference Water Index* (NDWI) melhorado, utilizado para delimitar os corpos d'água. É esperado que o corpo d'água tenha maior reflectância no verde, acompanhada de uma alta absorção no infravermelho próximo (POLIDORIO et al., 2004).

$$NDWI_e = \frac{(Verde - 4 \text{ Infravermelho Próximo})}{(Verde + 4 \text{ Infravermelho Próximo})} \quad (30)$$

O terceiro índice espectral é o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), capaz de distinguir feições de cobertura vegetal como florestas ombrófilas, mangues, campos e restingas que se caracterizam pela absorção do vermelho e reflexão no infravermelho próximo (JENSEN, 2000).

$$NDVI = \frac{(\text{Infravermelho Pr\u00f3ximo} - \text{Vermelho})}{(\text{Infravermelho Pr\u00f3ximo} + \text{Vermelho})} \quad (31)$$

O quarto \u00edndice espectral \u00e9 o *Bare Soil Index* (BSI), utilizado para distinguir fei\u00e7\u00f5es de \u00e1reas urbanas, solo exposto e \u00e1reas de pouca cobertura vegetal. Esse \u00edndice \u00e9 baseado na maior reflect\u00e2ncia de alvos com solo exposto nas bandas do infravermelho m\u00e9dio e vermelho, e na baixa reflex\u00e3o destes alvos no infravermelho pr\u00f3ximo e azul (JOSHI et al., 2006).

$$BSI = \frac{(\text{Infravermelho M\u00e9dio} + \text{Vermelho}) - (\text{Infravermelho Pr\u00f3ximo} - \text{Azul})}{(\text{Infravermelho M\u00e9dio} + \text{Infravermelho Pr\u00f3ximo} + \text{Vermelho} + \text{Azul})} * 100 + 100 \quad (32)$$

As fei\u00e7\u00f5es de linha de costa podem ter uma ampla reposta espectral em contato com a \u00e1gua incluindo solos (cord\u00f5es arenosos, plan\u00edcies lamosas e fal\u00e9sias ativas) e vegeta\u00e7\u00f5es (manguezais, campos e restingas). Nessas condi\u00e7\u00f5es, o inconveniente \u00e9 a presen\u00e7a de nuvens que foram inicialmente mapeadas com a aplica\u00e7\u00e3o de um limiar no VIS+NIR gerando classes de nuvem e n\u00e3o-nuvem. As fei\u00e7\u00f5es de n\u00e3o-nuvem e seus atributos herdados foram utilizados para discriminar as classes de terra e \u00e1gua atrav\u00e9s de um limiar no NDWI. Para corrigir fei\u00e7\u00f5es classificadas erroneamente como nuvem e terra adotou-se limiares no NDVI e BSI em um processo de reclassifica\u00e7\u00e3o (Tabela 10).

Tabela 10 - Processos e regras de classifica\u00e7\u00e3o orientada a objeto usadas para mapear fei\u00e7\u00f5es de linha de costa na ZCA.

Processo	Subprocesso	Algoritmo	Classe	Par\u00e2metro/Regra
Segmenta\u00e7\u00e3o	-	Multiresolu\u00e7\u00e3o	Todas	Escala ⁹ 15; Forma ¹⁰ 0,1; Compacidade ¹¹ 0,5
Classifica\u00e7\u00e3o	Nuvem	Atribui\u00e7\u00e3o	Nuvem	$\bar{X}_{vis/nir} = \frac{VIS + NIR}{4} > 1400$
			N\u00e3o Nuvem	$\bar{X}_{vis/nir} = \frac{VIS + NIR}{4} \leq 1400$
	\u00c1gua/Terra	Atribui\u00e7\u00e3o	\u00c1gua	$NDWI = \frac{G - 4NIR}{G + 4NIR} > -0.8$
			Terra	$NDWI = \frac{G - 4NIR}{G + 4NIR} \leq -0.8$
Reclassifica\u00e7\u00e3o	Nuvem/\u00c1gua	Atribui\u00e7\u00e3o	Nuvem	$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} < 0.1$
	\u00c1gua/Terra	Atribui\u00e7\u00e3o	Terra	$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} > 0.4$
	\u00c1gua/Terra	Atribui\u00e7\u00e3o	Terra	$BSI = \frac{(MIR + R) - (NIR - B)}{(MIR + NIR + R + B)} + 1 \geq 1.9$

⁹ Escala \u00e9 o par\u00e2metro de agrupamento espacial para a unidade m\u00ednima de resolu\u00e7\u00e3o de uma imagem (pixels), neste caso, os valores de escala representam objetos em \u00e1rea, ou seja, quanto maior escala, maior o objeto.

¹⁰ Forma \u00e9 o par\u00e2metro que define um crit\u00e9rio de pondera\u00e7\u00e3o para o segmentador, logo quanto maior o valor de forma, menor \u00e9 a influ\u00eancia da cor no processo de segmenta\u00e7\u00e3o.

¹¹ Compacidade \u00e9 um crit\u00e9rio de pondera\u00e7\u00e3o para o segmentador, logo quanto maior o valor de compacidade tem-se mais objetos de forma compacta, e assim, objetos pontiagudos ou estreitos s\u00e3o menos presentes.

A detecção de mudanças focou as diferenças entre os estágios de linha de costa a priori e a posteriori caracterizando processos de progradação e retrogradação, tendo em vista o perfil temporal entre 2000 a 2014. A comparação foi feita por subtração de imagens pós-classificadas com base no estágio inicial e final (LU et al., 2004), seguido de um filtro espacial para feições menores que 1 km², a fim de minimizar contribuições não significativas ou erros geométricos provenientes da célula de resolução (500 m). Para variações de linha de costa, foram considerados dois eventos: i) a classe água tornou-se terra, isto devido ao aporte sedimentar, ocorrendo principalmente por deposição lamosa na planície costeira de intermaré. Além disso, a foz do rio Amazonas é capaz de desenvolver rapidamente manguezais (semianual) (GENSAC et al., 2016; SOUZA-FILHO et al., 2011); e, ii) a classe terra tornou-se água, isto devido ao recuo do linha de costa, associado a feições morfológicas de bancos lamosos a arenosos, canais de marés, deltas de maré vazante, diminuição de manguezais e cordões praias, e ainda, no contato entre terra firme com a água em falésias ativas (BATISTA et al., 2009; FRANÇA; SOUZA-FILHO, 2003).

Os períodos de equinócio de outono (março) e primavera (setembro), sob condições de maré alta e baixa de sizígia devem apresentar os ambientes costeiros de forma mais reveladora, pelo fato de ter os extremos da atual linha de costa (FRANÇA; SOUZA-FILHO, 2003; SANTOS, 2006; SOUZA FILHO et al, 2006).

5.1.3.3 Análises Estatísticas e Acurácia Temática

A análise espacial da variação de linha de costa foi obtida pela mudança costeira total (MCT) e balanço sedimentar (BS). A primeira medida foi definida como a soma de áreas entre a acreção e a erosão, enquanto a segunda medida foi obtida subtraindo as áreas de acreção e erosão, ambas representadas em termos de taxa anual. Assim, tanto as variações de linha de costa quanto os setores costeiros da ZCA, foram tabulados e comparados por meio da diferença mínima estatística para média e variância. Os testes T-Student e F-Snedecor, considerando 95% do nível de confiança, foram empregados em conjuntos amostrais independentes para aceitar a hipótese de similaridade ou recusá-la.

A mesma operação foi realizada para a localização e quantificação de mudanças costeiras entre os dois grupos de similaridade, ao considerar feições de acreção e erosão, sendo que a ocorrência dos eventos de mudanças costeiras foi obtida do centróide das feições. Para a espacialização desses fenômenos, foi usado o estimador de densidade Kernel, que calcula a magnitude de uma feição pontual ou linear por unidade de área ponderado por uma função

Kernel e uma regra de suavização e ajuste (MAGUIRE et al., 2005). Foi utilizado o raio de vizinhança no interpolador de 25 km, em função da extensão dos pontos de entrada estar em aproximadamente 1111 km (largura de faixa do produto MOD09).

Para avaliar o desempenho dos atributos do classificador e acurácia do mapa temático, foram aplicadas abordagens estatísticas baseadas nas medidas de distância/similaridade de Jeffries-Matusita (JM) e Divergência Transformada (DT), e na Matriz de Confusão, respectivamente. As distâncias JM e DT funcionam de forma complementar, pois estes coeficientes comparam em n -dimensões de atributos ($l=1,2,3, \dots, L$) por meio da estimativa da função densidade de probabilidade normal para uma dada classe espectral, de modo que é possível concluir a priori a separabilidade entre conjuntos para um classificador probabilístico. Ambos coeficientes variam de 0 a 2 os quais valores maiores que 1,8 são bastante distintos e valores abaixo de 1,0 devem ser desconsiderados ou agrupados em uma única classe (RICHARDS; JIA, 2006). Vale ressaltar que as métricas JM e DT servem prioritariamente para selecionar atributos estatisticamente significativos para discriminar feições por um classificador probabilístico.

A partir de vetores espectrais S_1 e S_2 de classes de interesse, é possível medir a separabilidade entre as funções densidade de probabilidade normal com distância JM de p_l e q_l com expectativa de comportamento normal, por meio:

$$JMD(S_1, S_2) = \sqrt{\sum_{l=1}^L (\sqrt{p_l} - \sqrt{q_l})^2} \quad (33)$$

sendo que:

(S_1, S_2) : vetores espectrais das classes de interesse;

(p_l, q_l) : função densidade de probabilidade com distância JM de comportamento normal;

A estatística JM avalia a diferença (distância) entre duas funções densidade de probabilidade associadas à duas classes de modo que é definido um critério entre as funções de probabilidade considerando alcançar um comportamento provavelmente classificável. A métrica é obtida pela distância de Bhattacharyya (B), a partir dos vetores média ($\bar{X}_{S_1}; \bar{X}_{S_2}$) e matrizes de covariância ($C_{S_1}; C_{S_2}$) das duas classes S_1 e S_2 que estão sendo avaliadas:

$$\left\{ \begin{array}{l} B = \frac{1}{8} (\bar{X}_{S_1} - \bar{X}_{S_2})^T \left[\frac{C_{S_1} + C_{S_2}}{2} \right]^{-1} (\bar{X}_{S_1} - \bar{X}_{S_2}) + \frac{1}{2} \ln \left[\frac{|C_{S_1} + C_{S_2}|}{\sqrt{|C_{S_1}| |C_{S_2}|}} \right] \\ JM_{S_1 S_2} = 2(1 - e^B) \end{array} \right. \quad (34)$$

sendo que::

$(\bar{X}_{s_1}; \bar{X}_{s_2})$: vetores média;

$(C_{s_1}; C_{s_2})$: matrizes de covariância.

Congalton e Green (2009) referem-se a matriz de confusão como uma tabulação entre amostras (n) de elementos preditos (classificados, n_i) e observados (referência, n_j) com a constatação de comparação correta para um conjunto de categorias possíveis (k) o qual oferece uma medida de efetividade do modelo, expresso por:

$$n_{i+} = \sum_{j=1}^k n_{ij}; n_{+j} = \sum_{i=1}^k n_{ij} \quad (35)$$

sendo que:

n_i : elementos classificados;

n_j : elementos observados.

A matriz de confusão permite calcular o coeficiente de *Kappa* que mede a probabilidade de concordância e expectativa de discordância entre classes e uma referência de erro controlado ou conhecido (CONGALTON; GREEN, 2009).

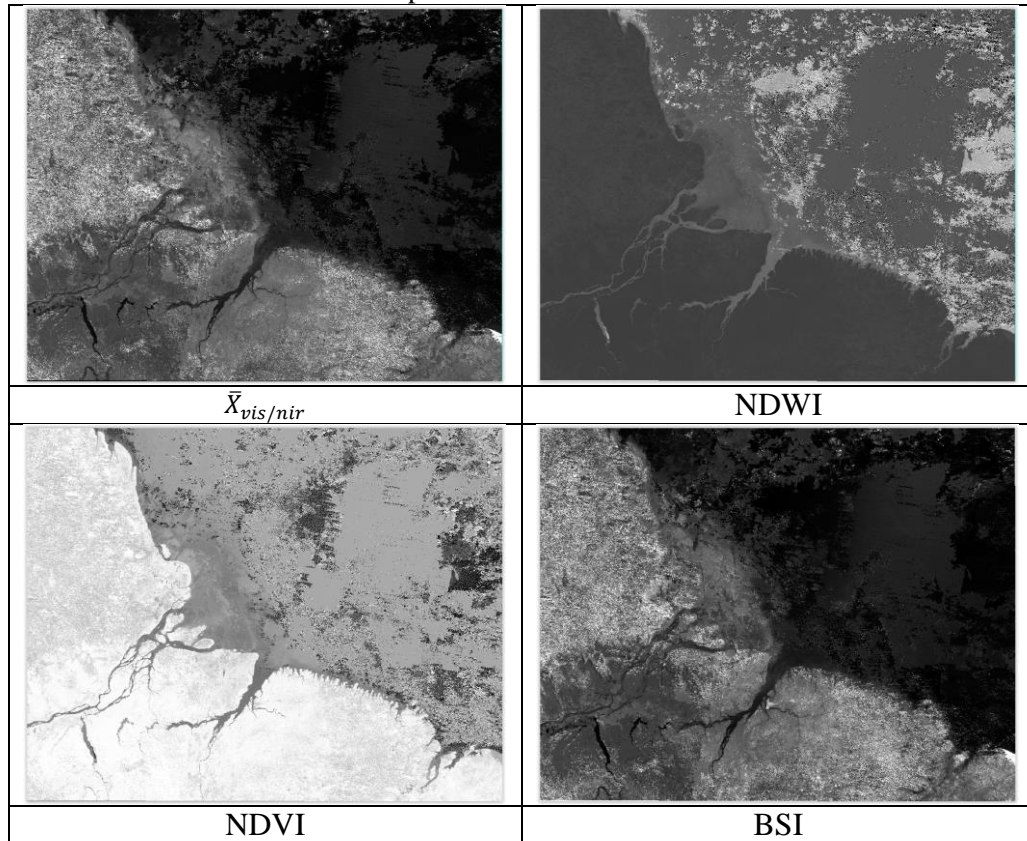
Para fins de referência amostral temática, as imagens Landsat 8 do sensor *Operational Land Imager* (OLI) foram utilizadas em nível L1T (ortorretificado), 30 metros de resolução espacial, considerando os anos de 2000 e 2014, e cobertura de nuvem inferior a 10% (USGS, 2015a). A área da ZCA foi coberta com 8 cenas para o estágio inicial e final, totalizando 16 imagens. Utilizou-se 568 GCP para as feições de água, terra, acreção e erosão, estes foram obtidos através de amostragem aleatória estratificada para 10% do conjunto de pixels inicial contidos no mapa de detecção de mudanças.

5.1.4 Resultados e Discussões

5.1.4.1 Caracterização Espectral e Balanço Sedimentar

A interface terra/água da ZCA foi delineada por meio dos índices $\bar{X}_{vis/nir}$, NDWI, NDVI e BSI extraídos dos dados MODIS no período de 2000 a 2014. O índice VIS+NIR identificou nuvens e não-nuvens, por seguinte o NDWI diferenciou feições de terra e água, e, os índices NDVI e BSI foram utilizados majoritariamente para reclassificação (Figura 26).

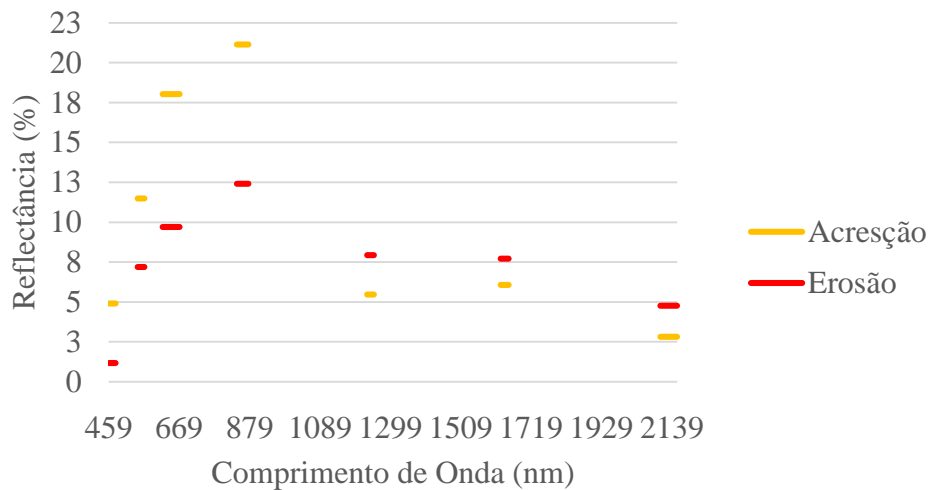
Figura 26 - Exemplo de imagem MODIS do ano de 2014 com os principais índices espectrais utilizados para delinear a linha de costa.



As classes de água e terra foram bastante discerníveis para as bandas espectrais do MODIS, especificamente, nas regiões do visível (bandas 1, 3 e 4) e infravermelho próximo (banda 2). A reflectância de superfície inferior a 15% nas bandas 1 e 2 refere-se as feições de erosão que correspondiam a porções de terra como manguezais, barras arenosas, bancos lamosos e terra firme, estes convertidos em feições de águas rasas afetadas por resposta do solo e água. A maior refletância de superfície nas porções do visível e infravermelho próximo ocorre na ordem de 22% nas bandas 1 e 2 referente a feições com aporte sedimentar, provavelmente,

correspondendo ao recente desenvolvimento de bancos lamosos, barras arenosas e manguezais os quais colonizaram águas rasas. A forma do perfil de deposição de sedimentos assemelhou-se a curva espectral da vegetação, pelo fato da zona costeira ainda contar com majoritária cobertura vegetal (Figura 27).

Figura 27 - Curvas espectrais mostrando o comportamento das feições de mudanças costeiras.

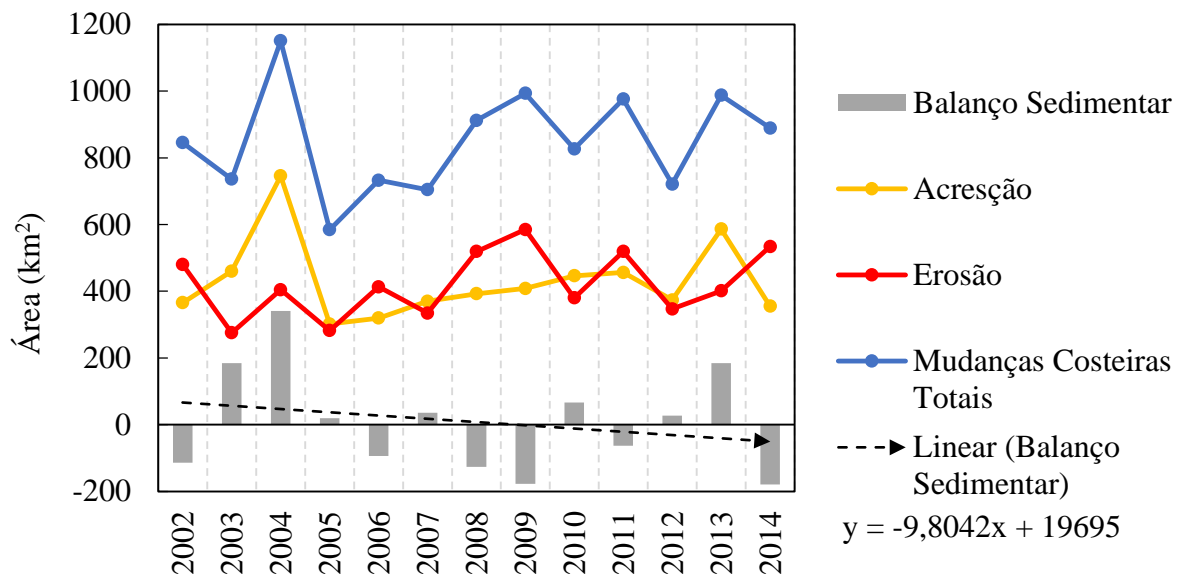


As variações de linha de costa foram assumidas como feições sutis devido à pequena área mapeada correspondente a 11.058,08 km² de MCT, representando 0,08% da área total mapeada (13.994.821,75 km²) no período entre 2000 e 2014. As áreas totais de acreção foram de 5.582,18 km² com uma taxa de 372,15 km².ano⁻¹ e as áreas totais de erosão foram 5.475,90 km² com taxa de 365,06 km².ano⁻¹. Essas medidas denotam a alta dinâmica costeira no estuário delta da Amazônia, o que está de acordo com outros estudos locais como de Nascimento et al. (2013) que registraram 3126 km² de MCT na porção oriental da ZCA durante 12 anos e Guimarães et al. (2014) com 853 km² de MCT na baía de Marajó, durante 29 anos. O BS pode ser considerado estável com uma ligeira condição de acreção mostrando uma área de 106,27 km² sobre a taxa de 7,08 km².ano⁻¹.

Os dados MODIS possibilitaram uma análise regional das mudanças costeiras na ZCA que propiciou informações de ocorrência e magnitude ao longo do perfil histórico de 15 anos. A Figura 28 mostra um pico alto de deposição de sedimentos (745,79 km²) em 2004, o qual pode estar relacionado a uma seca extrema que ocorreu em grande parte da bacia amazônica (MARENGO et al., 2008). Apesar da ligeira condição de acreção na ZCA, e considerando uma projeção linear, o BS apresentou uma tendência erosiva (inclinação da reta em -9,80). Esse cenário enfatiza a demanda de esforços para monitorar variações de linha de costa, em pelo

menos de 10 km de continente a dentro, como sugerido pelo IPCC (2014) para evitar impactos fortes em áreas urbanas ou infraestrutura portuária principalmente sob marés altas ou ressacas durante março e abril no caso da ZCA.

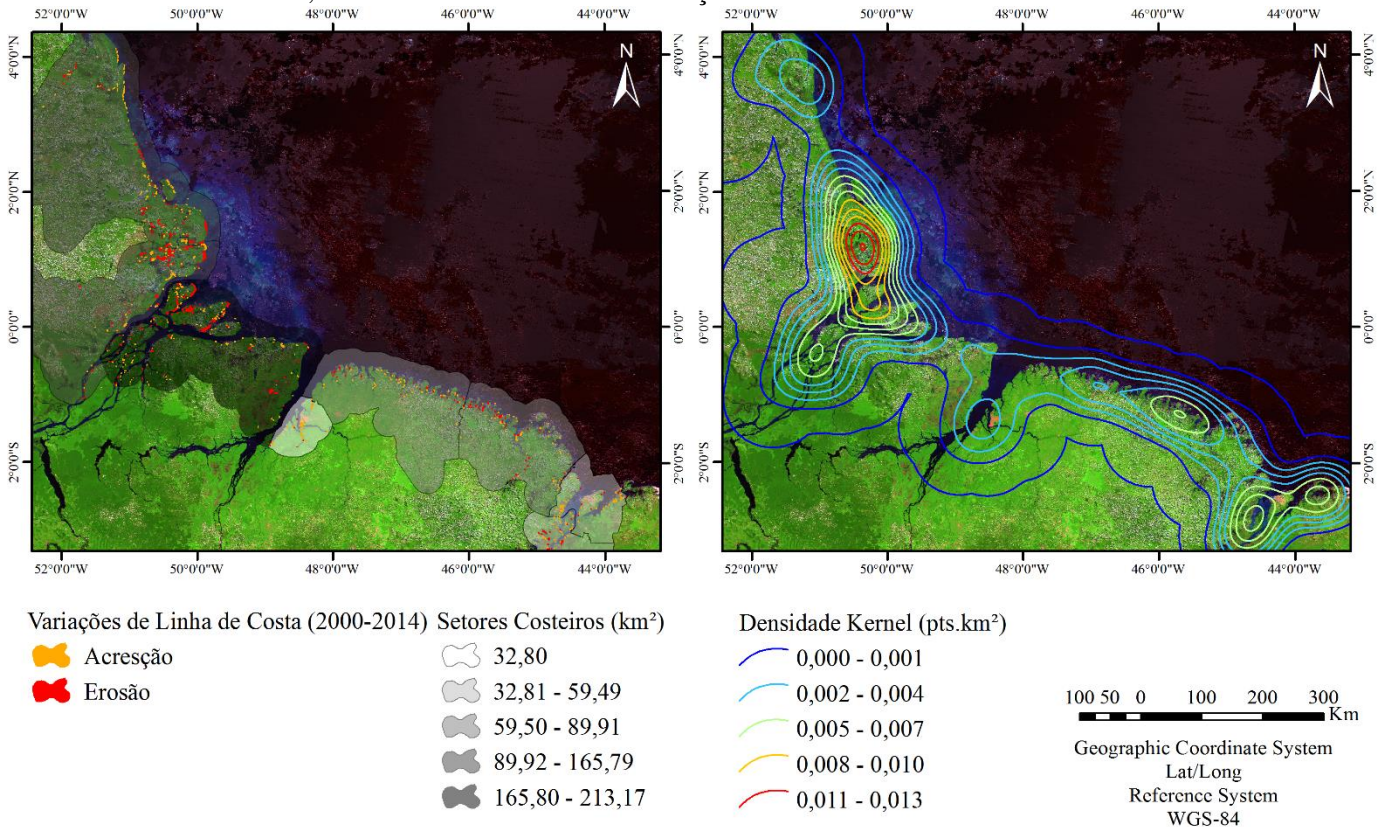
Figura 28 - Balanço sedimentar na ZCA com um pico de deposição sedimentar entre 2004 e 2005 durante um período de seca, em adição, a tendência linear ligeiramente erosiva.



De todos os setores costeiros analisados, o IE apresentou a maior dinâmica de variações de linha de costa com MCT média com $213,17 \pm 56,46 \text{ km}^2$ e BS positivo de média $20,65 \pm 73,59 \text{ km}^2$. Esse setor é formado pela desembocadura norte e sul do rio Amazonas, com forte associação com a gigantesca descarga de sedimentos e ao fluxo e refluxo de macromarés (EL-ROBRINI et al., 2006; FRANÇA; SOUZA-FILHO, 2003; SANTOS, 2006). O setor costeiro CE apresentou a menor dinâmica de variações de linha de costa com MCT médio de $32,80 \pm 17,44 \text{ km}^2$ e BS negativo de média $-2,10 \pm 22,64 \text{ km}^2$. Por estar inserido na porção sul da baía de Marajó, esse setor está protegido pelo continente, o que minora os efeitos das ondas, marés e correntes do Oceano Atlântico. O mapa de densidade de variações de linha costa, mostrado na Figura 29, apresentou uma superfície média de $0,0028 \pm 0,0025 \text{ ponto.km}^{-2}$, em que a maior densidade de variações de linha de costa foi mostrada na costa leste do Amapá com $0,013 \text{ ponto.km}^{-2}$ representando os setores IE, Am e At, controversamente, a menor densidade de variações de linha de costa foi observada no setor CE com $0,001 \text{ ponto.km}^{-2}$. A costa do Amapá mostra-se altamente suscetível à dinâmica de variações de linha de costa, pelo fato da orientação de linha de costa N-S enfrentar a deriva Norte-Atlântica que mobiliza majoritariamente a vazão e os sedimentos do rio Amazonas na direção E-W (SANTOS, 2006). A forte dinâmica de

mudanças costeiras na costa da Amapá converge aos estudos de maior escala de detalhe realizados por Batista et al. (2009) que calculou MCT médio na ordem de 57,22 km² durante 1980 a 2003.

Figura 29 - Variações de linha de costa mapeadas na ZCA para feições de acreção e erosão, além disso, é mostrada a densidade de variações de linha de costa com isolinhas.



5.1.4.2 Diferenças Estatísticas e Avaliação Temática

A diferença estatística entre conjuntos amostrais foi realizada para os oito setores costeiros exibidos em pares, e, apenas três pares [Am/At; LO/CAP; GM/BM] foram considerados estatisticamente iguais para média e variância de MCT (Tabela 11). Os setores costeiros IE e CE mostraram médias do MCT totalmente diferente dos outros setores costeiros, respectivamente a maior e menor. O setor IE mostrou na análise da variância similaridade com outros setores costeiros como Am e At. Os setores costeiros At e Am apresentaram comportamento semelhante para a costa do Amapá, no qual os sedimentos do rio Amazonas são mobilizados preferencialmente para NW. Os setores CAP e LO foram considerados estatisticamente iguais e estão situados na porção nordeste do Estado do Pará e noroeste do Maranhão, esta porção do litoral se caracteriza por falsas reentrâncias com grandes extensões

de manguezais desenvolvidos e estáveis na ordem de 5.493 km² (SOUZA-FILHO et al., 2011). Outras áreas protegidas pelo continente, tais como GM e BM se mostraram semelhantes, provavelmente relacionadas com a posição afastada da foz do rio Amazonas com maior influência oceânica, além de que a direção da pluma sedimentar baseada na deriva oceânica (SE-NW) segue no sentido do Mar do Caribe (EL-ROBRINI et al., 2006).

Tabela 11 - Testes estatísticos para diferença mínima significativa da média e variância das Mudanças Costeiras Totais (MCT).

Setores Costeiros		Am	At	IE	CE	CAP	LO	GM	BM
Am	T	-	0,16	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	F	-	0,22	0,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
At	T	0,16	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	F	0,22	-	0,19	0,01	0,03	0,04	0,00	0,01
IE	T	0,04	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	F	0,91	0,19	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CE	T	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,02	0,00
	F	0,00	0,01	0,00	-	0,70	0,64	0,41	0,97
CAP	T	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,10	0,00	0,03
	F	0,00	0,03	0,00	0,70	-	0,94	0,23	0,73
LO	T	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	-	0,00	0,00
	F	0,00	0,04	0,00	0,64	0,94	-	0,20	0,67
GM	T	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	-	0,08
	F	0,00	0,00	0,00	0,41	0,23	0,20	-	0,39
BM	T	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,08	-
	F	0,00	0,01	0,00	0,97	0,73	0,67	0,39	-
\bar{X} (km ²)		165,79	138,85	213,17	32,80	76,59	89,91	48,21	59,49
Sdv. (km ²)		54,59	38,01	56,46	17,44	19,54	20,00	13,68	17,63

\bar{X} : Média das MCT entre 2000-2014; Sdv.: Desvio Padrão de MCT entre 2000 e 2014; T: *p*-valor do teste T-Student; F: *p*-valor do teste F-Snedecor

Os atributos utilizados no mapeamento das classes de água e terra alcançaram bom desempenho para distinção espectral confirmada pela distância JM de 1,63, no entanto, a excelente condição de separabilidade acima de 1,8 só foi alcançada em 5 classificações do total de 26. A pior separabilidade entre 1,18 em 1,40 ocorreu em 4 classificações, estas caracterizadas por notável presença de nuvens, neblinas e brumas. O mapeamento de água e terra deve alcançar alta separabilidade, suportando obter acurácias temáticas entre 90 e 95%. Entretanto, a principal restrição para o mapeamento relacionou-se a falsos positivos e falsos negativos, estes provavelmente associados a erros radiométricos constatados na banda 1 (vermelho) de ordem maior do que 40% na estimativa da reflectância, ao se considerar a faixa tropical úmida costeira da Amazônia, de acordo com o estudo multitemporal de Gonzalez et al. (2016). A ZCA possui

constante instabilidade meteorológica ao longo do ano o que propicia nuvens densas de alto crescimento vertical aliado a brumas e neblinas (MARTORANO, 1993).

O mapa de variações de linha de costa da ZCA obteve um desempenho muito bom, com uma acurácia global de 72,62% e coeficiente *Kappa* de 0,63, em comparação com a referência de dados do sensor Landsat. Este mapeamento mostra potencial para atender escalas espaciais regionais de 1:250.000 ou menor, e escala temporal anual a decadal. O melhor desempenho entre classes foi encontrado para o mapeamento da erosão com acurácia do produtor de 85,96%, mas o pior desempenho foi obtido para a água com acurácia do produtor de 58,21%. A acurácia do usuário com desempenho entre 63 e 66%, está relacionada às feições de acreção e erosão, este desempenho foi um dos piores por causa da diferença entre as resoluções espaciais fornecidas pelos dados Landsat (30 m) e MODIS (500 m) o que leva a muitas ocorrências falsas nos GCPs. A maior confusão temática ocorreu entre feições de água e erosão, e, acreção e água, ao se observar os erros de comissão e omissão, portanto, a água deve ser precisamente mapeada nos conjuntos de regras para minorar os problemas de acurácia temática (Tabela 12).

Tabela 12 - Matriz de confusão elaborada para o mapeamento de variações de linha de costa na ZCA.

Variações de Linha de Costa x Landsat							
Matriz de Confusão	Acresção	Erosão	Terra	Água	∑ Linha	Comissão	Acurácia do Usuário (%)
Acresção	99	17	18	23	157	36,94%	63,06%
Erosão	19	147	30	24	220	33,18%	66,82%
Terra	3	3	87	9	102	14,71%	85,29%
Água	3	4	2	78	87	10,34%	89,66%
∑ Coluna	124	171	137	134	566		
Omissão (%)	20,16	14,04	36,50	41,79			
Acurácia do Produtor (%)	79,84	85,96	63,50	58,21			
Acurácia Global = 72,62%				Coeficiente <i>Kappa</i> = 0,63			

Foi perceptível que o mapeamento da acreção e erosão por meio de uma unidade mínima de mapeamento de 1 km² foi muito desafiador e difícil, por outro lado, foi adequado considerar esta unidade mínima de mapeamento em função da magnitude e frequência dos processos de mudança costeira na ZCA, aliado a visão sinóptica dos dados MODIS sub-quilométrica de resolução espacial aplicados a uma costa de mais de 1200 km de extensão.

Em relação à precisão temática, dois aspectos devem ser enfatizados: i) o conjunto específico de regras e parâmetros elaborados no OBIA foi capaz de mapear terra e água através dos produtos MOD09 através dos índices espectrais, embora, houvesse ambiguidade, ruído, interferência de nuvens, neblinas e sombras; e ii) os dados de referência do Landsat são adequados para uma escala de 1:100.000 até 1:70.000 resultando em um erro geométrico

circular em 90% com 12 metros (USGS, 2015b), o que propaga os erros já contidos no Landsat aliado a inconsistências provenientes de feições detalhadas em torno de rios estreitos e linhas de costa delgadas.

Os estudos de Nascimento et al. (2013), Souza-Filho et al. (2011) e Souza Filho et al. (2006) envolvidos no mapeamento de ambientes costeiros do litoral amazônico atingiram coeficientes *Kappa* entre 0,66 e 0,91, utilizando dados detalhados de sistemas ópticos e radar em aplicações locais a regionais.

5.1.5 Conclusões

Os dados MODIS permitiram uma visão abrangente única da ZCA baseada em bandas multiespectrais e larguras de faixa com grandes extensões (10 km), sendo que a análise de variações de linha de costa se estendeu em aproximadamente 1200 km sob forte cobertura nuvens ao longo de todo o ano. É destacável a sensibilidade espectral dos dados MODIS para separar terra e água (JM=1,63), em termos de bandas espectrais e composição de cenas em 8 dias de aquisição.

O ZCA em sua série de 15 anos (2000-2014) mostrou-se ser um ambiente extremamente dinâmico com um total de deposição de sedimentos de 5.582,18 km² sob uma taxa de 372,15 km².ano⁻¹ e uma erosão total de 5.475,90 km² sob uma taxa de 365,06 km².ano⁻¹. Além disso, o balanço sedimentar foi de 106,27 km² sob uma taxa de 7,08 km².ano⁻¹, mostrando uma condição ligeiramente acrescional. O setor IE demonstrou ser o mais dinâmico da ZCA, observado as mudanças costeiras totais em 213,17 ± 56,46 km² e balanço sedimentar de 20,65 ± 73,59 km². De fato, nos últimos nove anos (2006-2014), as variações de linha de costa indicaram uma tendência erosiva com mudanças costeiras totais em 97,35 ± 68,65 km² e balanço sedimentar de -3,21 km².ano⁻¹.

O monitoramento de variações de linha de costa foi consistente a nível regional (escala de 1:250.000 ou menor) e escala temporal decadal, ao considerar uma unidade de mapeamento mínimo de 1 km² e o desempenho temático de 0,63 para o coeficiente *Kappa*. No entanto, é pertinente expandir a amostragem temporal utilizando a estação chuvosa baseado em sensores de radar em modo ScanSAR e o período seco mantido em óptico, essas abordagens permitirão medições precisas para a dinâmica da ZCA.

5.2 Mapeamento de Ambientes Costeiros

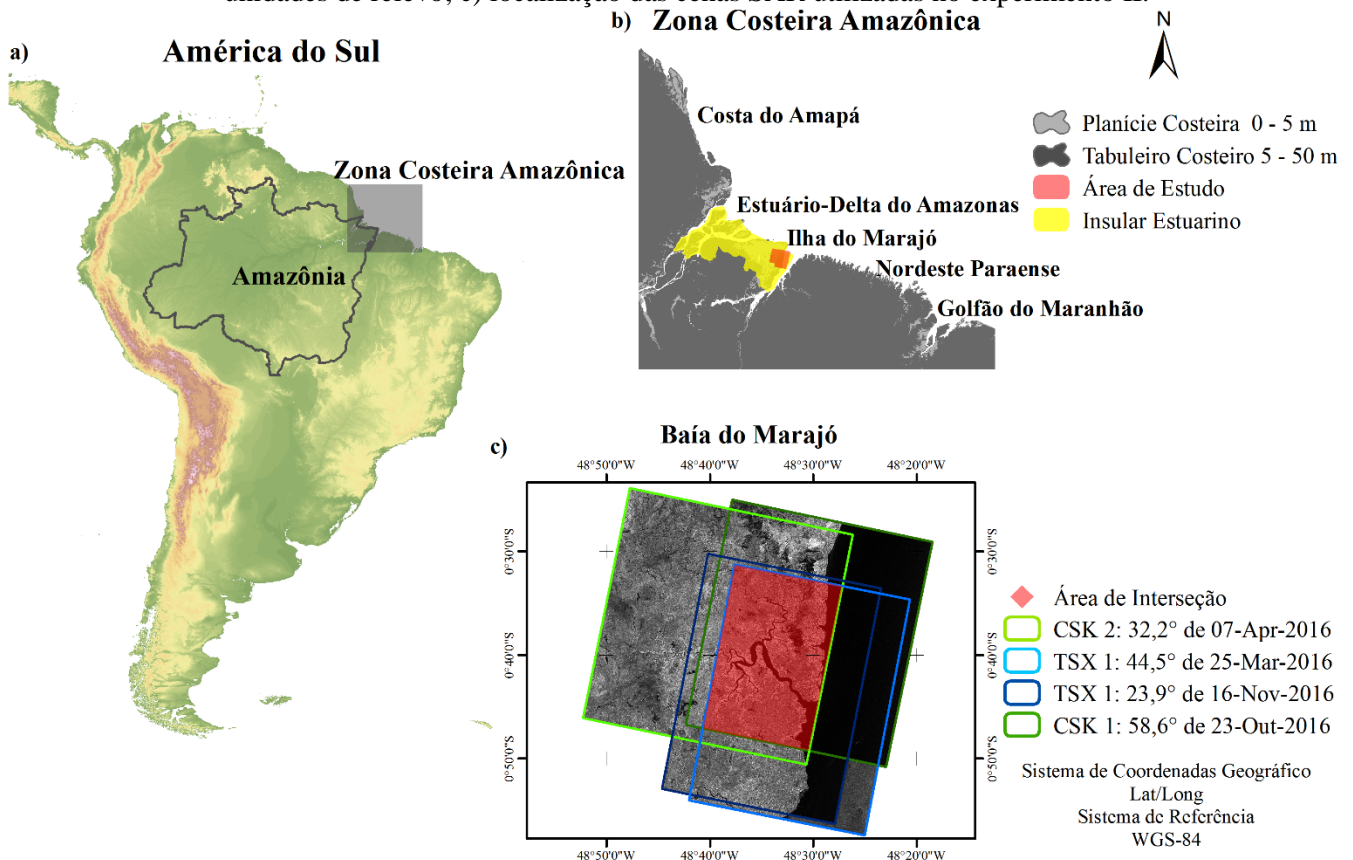
5.2.1 Objetivo

Este experimento contribuiu nos estudos da ZCA por caracterizar e mapear ambientes costeiros ao utilizar coeficiente de retroespalhamento, aplicar uma cadeia de processamento SAR em amplitude e considerar a geometria de aquisição íngreme ($\theta < 35^\circ$) e rasante ($\theta \geq 35^\circ$), durante as estações chuvosa e seca.

5.2.2 Área de Estudo

A dinâmica de variações de linha de costa foi considerada na especificação da área do experimento II, que face à característica de mapeamento temporal, foi delineada pela interseção das faixas de imageamento SAR, definidas pelas órbitas descendentes dos satélites CSK e TSX. Estas quatro cenas SAR cobrem a borda leste da Ilha de Marajó, na margem esquerda da Baía de Marajó e dentro do setor Insular Estuarino da ZCA (Figura 30).

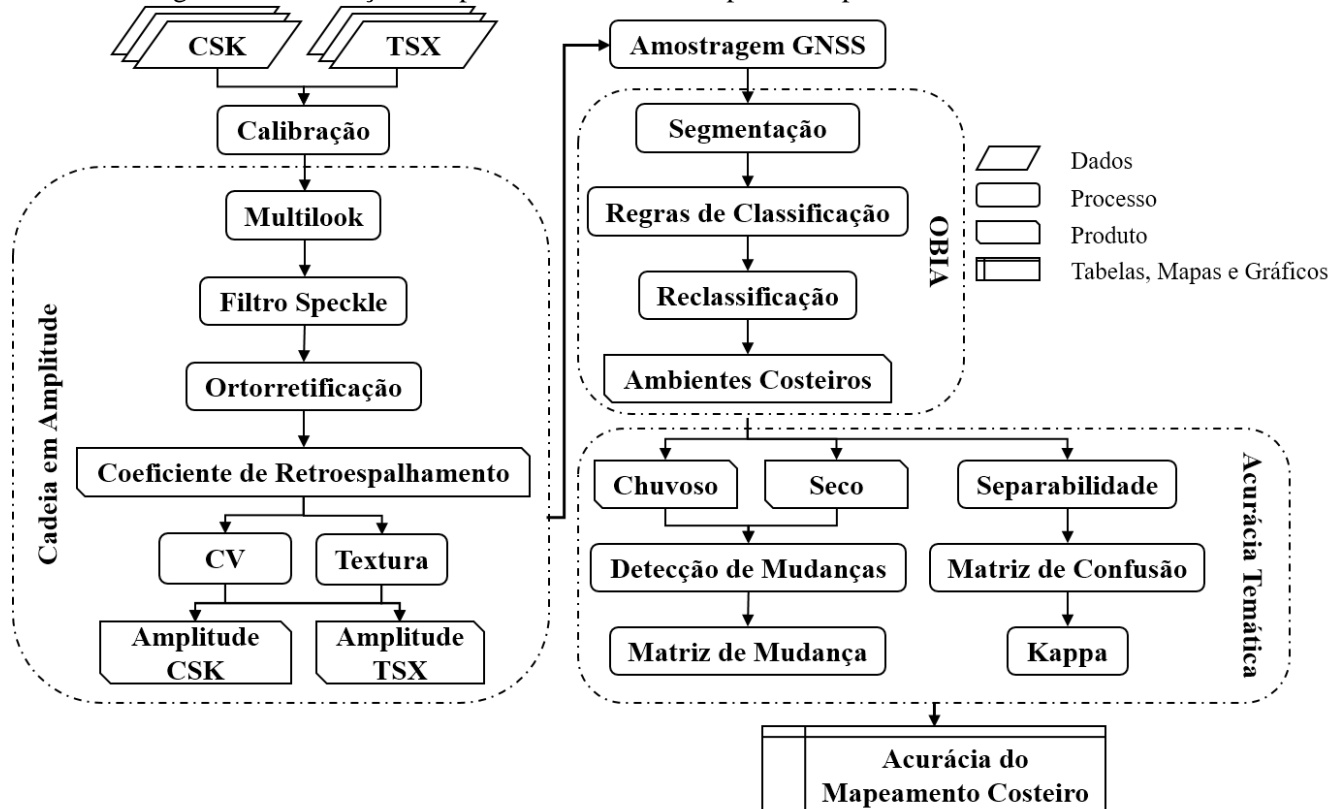
Figura 30 - a) Localização da zona costeira amazônica; b) compartimentos da costa amazônica com unidades de relevo; c) localização das cenas SAR utilizadas no experimento II.



5.2.3 Método

Este experimento teve como foco: i) gerar imagens em amplitude, calibradas em radiometria e ortorretificadas, conforme reportado nos manuais da ESA (2014) e SARMAP, (2016). Além disso, foram acrescentados ao espaço de atributos das imagens os derivados de coeficiente de variação e medidas de textura; ii) usar classificador OBIA para a mapeamento dos ambientes costeiros seguindo procedimentos de segmentação em multiresolução e regras de atribuição hierárquicas (BLASCHKE, 2010); e, iii) detectar mudanças para os mapas de ambientes costeiros, e em seguida, estes foram avaliados de acordo a acurácia temática (CONGALTON; GREEN, 2009; RICHARDS; JIA, 2006). Os procedimentos realizados nesta etapa são mostrados abaixo na Figura 31:

Figura 31 - Descrição dos procedimentos usados para o mapeamento de ambientes costeiros.



5.2.3.1 Cadeia de Processamento em Amplitude

Para obter propriedades eletrogeométricas a partir das feições de Planície Costeira (PC), Tabuleiro Costeiro (TC), Terraço Fluviomarinho (TFM) e Hidrografia (Hi), os dados SAR foram calibrados para o coeficiente de retroespalhamento (σ^0) em escala logarítmica, definida por decibéis (db). Esse procedimento torna os alvos SAR comparáveis a longo do tempo dado um mesmo ângulo de incidência (WOODHOUSE, 2006).

A fim de minimizar o efeito *speckle*, foram utilizados os procedimentos de *multilook* e o filtro de distribuição Gamma, este último maximiza a textura da cena em ambientes de textura heterogênea (vegetação e diferentes coberturas de solo) e relevo não abrupto. Foi considerado pelo menos 3 vezes o tamanho da célula de resolução para cada imagem SAR. Neste caso, o CSK foi projetado no terreno com 9 m, variando entre 3 e 4 *looks*, e dependendo do ângulo de incidência, tomadas rasantes permitiram melhor resolução espacial do que tomadas íngremes. O filtro Gamma é um operador espacial para *speckle*, baseado na distribuição estatística e textura dada pela cena SAR com moderada a alta heterogeneidade e relevos planos a suaves (LEE; POTTIER, 2009). O filtro Gamma foi executado em uma janela móvel de 5x5 e 5000 para a variabilidade de limiar.

A ortorrectificação foi realizada por meio das equações *Range-Doppler*, que permitem corrigir posições (x, y e z) e distorções geométricas intrínsecas da projeção em alcance inclinado para a projeção no terreno, considerando para tal, o vetor de estado da plataforma (trajeto e atitude), a cadência Doppler do sinal fornecido pelo sistema SAR e um MDE (GOBLIRSCH; PASQUALI, 1996; SCHREIER, 1993). Utilizou-se o MDE SRTM com 30 metros de resolução espacial, a reamostragem da amplitude foi bilinear para células quadradas projetadas em terreno com 9 m para CSK e TSX.

O σ^0 foi a informação espectral primária usada para o reconhecimento dos ambientes costeiros, no qual o sinal de retroespalhamento está diretamente relacionado à célula de resolução normalizada pela superfície incidente, tornando a radiometria comparável entre diferentes sistemas SAR ao longo do tempo (WOODHOUSE, 2006). Para aumentar a dimensionalidade dos atributos, foi gerada a *Gray Level Co-occurrence Matrix* (GLCM) e o coeficiente de variação (CV). O GLCM é uma tabulação para textura com combinações entre escalas de cinza dados pela variabilidade da cena ao longo de uma direção de observação (GONZALEZ; WOODS, 2010). O CV mede o impacto do desvio padrão na média, ajudando a entender o sinal e o ruído em termos de dispersão (LEE; POTTIER, 2009). Neste caso, o GLCM

e CV foram aplicados em uma janela móvel 3x3 para todas as direções os quais realçaram características do terreno imperceptíveis para os dados em análise monocromática.

Dois mecanismos consistentes para abordar a qualidade de dados SAR são o número equivalente de *looks* (NEL) e CV. O NEL é a medida qualitativa da relação sinal/ruído que denota áreas homogêneas de correlação espacial. Assim, modelos estatísticos de formação e pós-processamento SAR demandam estimativas sobre medidas de sinal independentes contidas na cena (LEE; POTTIER, 2009; WOODHOUSE, 2006).

5.2.3.2 Classificação de Ambientes Costeiros

O mapeamento consistiu em discriminar ambientes costeiros terrestres (Planície Costeira, Tabuleiro Costeiro e Terraço Fluviomarinho e) e água, já que imagens de radar definem melhor informações espaciais relacionadas ao relevo, expressas principalmente pelas variações de textura, e que tornam as abordagens orientadas a objeto adequadas para distinguir feições florestais e não florestais (MITCHELL et al., 2014). Desta forma, utilizou-se classificação orientada a objetos com algoritmos de segmentação *multiresolution* e classificação baseada em regras (TRIMBLE, 2014). A segmentação *multiresolution* gerou regiões pela fusão de elementos espacialmente próximos, unidos segundo critérios de homogeneidade (cromaticidade e forma), considerando um limiar de escala como parâmetro de solução (BAATZ; SCHÄPE, 2000; REJAUR RAHMAN; SAHA, 2008). O classificador baseado em regras rotulou as regiões, usando um limiar booleano aplicado ao atributo numérico considerado, segundo uma abordagem de herança e hierarquia, definida, neste estudo, em chave de interpretação (TRIMBLE, 2014).

Na segmentação foi utilizado um parâmetro de escala de 18, homogeneidade baseada em forma com valor 0,5 e compacidade de 0,1, produzindo-se objetos homogêneos de maior tamanho, orientados preferencialmente pela forma em detrimento da informação espectral, considerando a finalidade de mapeamento morfológico dos ambientes costeiros (NAPIERALSKI et al., 2013). Executou-se a classificação hierárquica por meio de regras específicas e únicas aos conjuntos de dados baseadas nos atributos procedentes de índices espectrais, texturais (GLCM), índice de forma (IF¹²) e relações de vizinhança (relações de borda entre classes) (HUSSAIN et al., 2013). A reclassificação foi aplicada posteriormente, sendo que

¹² IF é o índice que descreve o grau de suavidade da borda de um objeto, dado por $\frac{B_c}{4\sqrt{A_c}}$. B_c é o comprimento da borda de um objeto e $4\sqrt{A_c}$ é a borda da geometria de um quadrado com área A_c . em referência ao objeto.

a primeira iteração por classe e consistiu em aprimorar a classificação por operadores lógicos (Tabela 13). Por se tratar de um ambiente sujeito a dinâmica de maré, a ambiguidade espectral em polarização única SAR, em função do *speckle* e feições morfológicas sutis, decorrentes de planícies fluviomarinhas sinuosas, canais de maré, deltas de marés, entre outros, estas feições foram discriminadas apenas em abordagens por contexto e padrão (ARNESEN et al., 2013).

Tabela 13 - Processos e regras de classificação para o mapeamento dos ambientes costeiros amazônicos.

Processo	Subprocesso	Algoritmo	Classe	Regra/Parâmetro ¹³
Segmentação	-	Multiresolução	Todas	Escala 18 Forma 0,5 Compacidade 0,1
Classificação	Hidrografia	Atribuição	Hi	σ^0 [-18;-10] CV [0,1;0,25] Borda com Hi $\geq 0,1$
	Terraço Fluviomarinho	Atribuição	TFM	σ^0 [-16;-12] CV [0,1;0,3] Borda com TFM $\geq 0,4$
	Planície Costeira	Atribuição	PC	σ^0 [-14;-3] CV [0,3;0,8] GLCM [40;60] IF [1,5;3,5] Borda com PC [0,2;0,6] Borda com Hi [0,2;0,7] Borda com TFM [0,1;0,7]
	Tabuleiro Costeiro	Atribuição	TC	σ^0 [-14;-3] GLCM [40;60] IF [0,5;2,0] Borda com TC [0,2;0,6] Borda com nenhum [0,2;0,6]
Reclassificação	Terraço Fluviomarinho	Atribuição	PC/TC/Hi	Borda com TFM [0,2;0,9] Borda com nenhum [0,2;0,6]
	Planície Costeira	Atribuição	Hi/TFM	Borda com PC [0,3;0,9] Borda com nenhum [0,2;0,6]
	Tabuleiro Costeiro	Atribuição	TFM/PC	Borda com TC [0,3;0,9] Borda com nenhum [0,2;0,6]

5.2.3.3 Detecção de Mudanças e Acurácia Temática

A detecção de mudanças dos ambientes costeiros, utilizou comparação de imagens pós-classificadas e posterior subtração entre as cenas classificadas das estações chuvosa e seca (LU et al., 2004). Realizou-se uma suavização e filtragem espacial para feições menores do que uma janela móvel 3 x 3, pelo fato de que estas feições terem sido consideradas contribuições não

¹³ As regras e os parâmetros estão apresentados para os limiares máximos e/ou mínimos de todas as cenas classificadas, estes índices variam de cena a cena e foram aplicados com uma ou mais iterações. Nas fases de reclassificação aplica-se os índices com uma segunda condição de relação de vizinhança variando caso a caso.

significativas ou erros provenientes da variação posicional das células de resolução de 9 m. A unidade mínima de mapeamento para os dados SAR foi de 729 m² o que corresponde a um conjunto de 3 x 3 pixels com *multilook*. As análises de mudanças e os quantitativos foram tabulados na matriz de mudanças.

Para avaliar o desempenho do classificador e a acurácia do mapeamento morfológico costeiro, foram aplicadas abordagens estatísticas baseadas nas medidas de distância ou similaridade de JM e DT e na Matriz de Confusão, respectivamente. A estatística JM foi utilizada, pois permite avaliar a diferença (distância) entre duas funções densidade de probabilidade normal, associadas à duas classes por meio da distância de Bhattacharyya, a partir dos vetores média e matrizes de covariância das duas classes que estão sendo avaliadas.

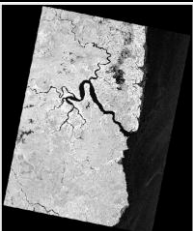
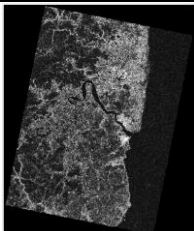
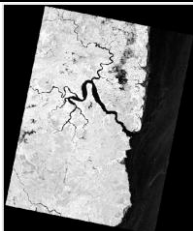
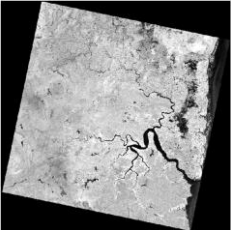
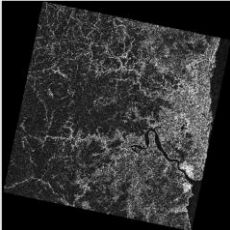
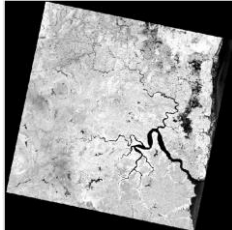
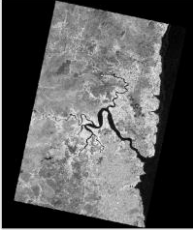
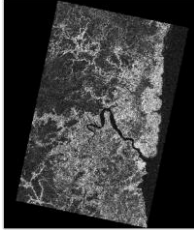
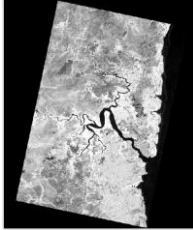
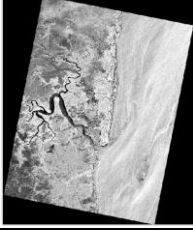
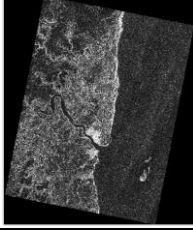
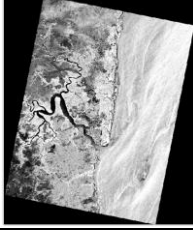
A matriz de confusão serviu como subsídio para análise da acurácia das classificações. De acordo com Congalton e Green (2009), essa matriz consiste da tabulação entre amostras de elementos preditos (classificados) e observados (referência) com a constatação de comparação correta para um conjunto de categorias possíveis, oferecendo uma medida da efetividade do modelo e permitindo calcular índices como o coeficiente de *Kappa* que mede a probabilidade de concordância e expectativa de discordância entre classes e uma referência de erro controlado ou conhecido. Os dados de referência foram os 165 pontos coletados em campo nos períodos de estiagem de 2015 e 2016, categorizados por ambiente costeiro.

5.2.4 Resultados e Discussões

5.2.4.1 Cadeia SAR em Amplitude

Os dados CSK e TSX possuem melhoria gradativa do sinal na discriminação de alvos. De fato, isto está relacionado às aquisições, partindo do período chuvoso para o seco, e da mesma forma, de ângulos de incidência íngremes para rasantes, ao se observar a variabilidade das cenas, em específico aos valores decorrentes de CV e NEL. A variabilidade tem comportamento decrescente, diminuindo a partir das cenas nas estações chuvosas com CV entre [0,33; 0,57] e decorre para estação seca com [0,31; 0,41]. O NEL funciona opostamente com aumento perante as cenas no decorrer do tempo, na estação chuvosa com intervalo em [0,94; 1,63] e alcança [1,16; 2,54] na estação seca. Assim, o ganho na relação sinal/ruído é expresso na diminuição da variabilidade da cena e na dependência dos elementos retroespalhadores (Tabela 14).

Tabela 14 - Estatísticas descritivas dos produtos CSK e TSX, obtidos no processamento SAR em amplitude.

Aquisição SAR	Estatísticas	σ^0	CV	GLCM Médio
TSX Chuvoso Rasante 25/03/2016	Min.: -60,00 Máx.: 6,99 Média: -11,61 Desvio: 6,56 CV: 0,57 NEL: 0,94			
CSK2 Chuvoso Íngreme 07/04/2016	Min.: -60,00 Máx.: 6,99 Média: -10,59 Desvio: 3,50 CV: 0,33 NEL: 1,63			
CSK2 Seco Rasante 31/10/2016	Min.: -60,00 Máx.: 6,99 Média: -14,05 Desvio: 4,42 CV: 0,31 NEL: 2,54			
TSX Seco Íngreme 16/11/2016	Min.: -60,00 Máx.: 6,99 Média: -7,58 Desvio: 3,08 CV: 0,41 NEL: 1,16			

As cenas CSK e TSX respondem majoritariamente ao mecanismo superficial difuso, a incidência íngreme no período seco alcançou a maior intensidade de σ^0 com média de -7,58 db e a incidência rasante no período seco alcançou a menor intensidade de σ^0 com média de -14,05 db. Desta forma, a assinatura espectral dos alvos foi modulada pelos parâmetros de ângulo de incidência, mecanismo de espalhamento e constante dielétrica, a qual está em acordo aos estudos de Narvaes et al. (2010) ao considerar as alterações de brilho e a penetrabilidade sob diferentes perspectivas de aquisição SAR.

Nesta aplicação de dados CSK e TSX, constatou-se, para a área de estudo com relevo plano a ondulado e amplitude altimétrica de 42 m, não haver distorções geométricas severas para o ângulo de incidência entre 23,9° a 58,5°. Nota-se que os instrumentos SAR monocromáticos de polarização única são limitados a informação em intensidade dado o sinal/ruído inicialmente não significativo, para aplicação mapeamento morfológico baseado em classificadores pixel a pixel, entretanto, a exploração de textura e contexto viabilizam a discriminação de ambientes em escalas locais a regionais.

5.2.4.2 Caracterização Espectral e Mapeamento de Ambientes Costeiros

O atributo primário σ^0 , obtido na cadeia de processamento SAR em amplitude, aliado aos dados colaterais derivados de CV, textura (GLCM médio) e índice de forma, permitiu definir limiares para as regras de mapeamento morfológico sob as estações chuvosa e seca, e também, os ângulos de incidências íngreme ($\theta < 35^\circ$) e rasante ($\theta \geq 35^\circ$). Formalizou-se um mecanismo de reconhecimento (chave de interpretação) capaz de associar as feições da imagem SAR aos ambientes costeiros. Interpretou-se dois tratamentos por ambiente costeiro, baseados nos aspectos de cor, textura, forma e padrão. Foi perceptível para os ambientes costeiros, observados sob mesma escala espacial (1:50.000) e realce (2%), que os maiores contrastes entre as feições PC, TC e TFM ocorreram nas estações secas, e para as estações chuvosas ocorreram maiores contrastes entre as feições terrestres e hidrografia (Tabela 15).

Tabela 15 - Chave de interpretação para reconhecer os ambientes costeiros amazônicos com imagens CSK e TSX, e respectivas aquisições no período seco e chuvoso sob incidência íngreme e rasante.

Ambiente Costeiro	CSK Chuvoso Íngreme	CSK Seco Rasante	TSX Chuvoso Rasante	TSX Seco Íngreme	Imagem de Campo
Cinza; Forte Rugoso; Circular/ Curvilíneo; Compacto					
Cinza Claro; Rugoso; Irregular Curvilíneo; Dendrítico					
Planície Costeira (PC)					
Cinza; Rugoso; Irregular; Compacto Dissecado					
Cinza Escuro; Liso; Regular; Compacto Dissecado					
Tabuleiro Costeira (TC)					
Cinza Escuro; Liso; Curvilíneo Alongado; Dissecado					
Cinza; Forte Liso; Circular; Alongado Compacto					
Terraço Fluviomarinho (TFM)					
Cinza; Liso; Curvilíneo; Alongado Compacto					
Cinza Escuro; Forte Liso; Curvilíneo; Alongado Compacto					
Hidrografia (Hi)					

A PC obteve tons de cinza moderado a claro e variou em formas curvilíneas sinuosas e estreitas nas porções mais continentais, e nas porções fluviomarinhas mais adjacentes a baía ocorreu em formas alongadas e compactas de forte rugosidade. Este relevo de agradação é

constituído por sedimentos inconsolidados arenosos a argilosos de origem fluviomarinha com a cadência de inundações controlada pela ação de marés e estações do ano. Neste ambiente costeiro estão presentes deposições lamosas, deltas, cordões arenosos atuais e antigos, terraços marinhos e dunas, a amplitude altimétrica está entre 0 a 5 m e declividade plana a suave ondulada (FRANÇA; SOUZA FILHO, 2006).

O TC é o ambiente costeiro de terra firme que se apresenta em formas compactas extensas em grande maioria, variando para feições irregulares a regulares, e o relevo tem formas dissecadas. Estas feições do TC variam na cobertura da terra entre solo exposto, vegetação secundária e formações florestais densas as quais remeteram tons de cinza claro, moderado e escuro com textura variando entre liso a rugoso. Este ambiente costeiro é um relevo de degradação consolidado, sustentado por rochas sedimentares do Terciário e/ou Quaternário oriundas das formações Barreiras e Pós-Barreiras, enquanto que as litologias mais presentes são arenitos a argilitos pouco litificadas (COSTA et al., 1996). Este ambiente, apresenta formas planas e suavemente onduladas sulcadas por drenagens com limites na costa por falésias ativas e inativas, a amplitude altimétrica está entre 5 a 30 m.

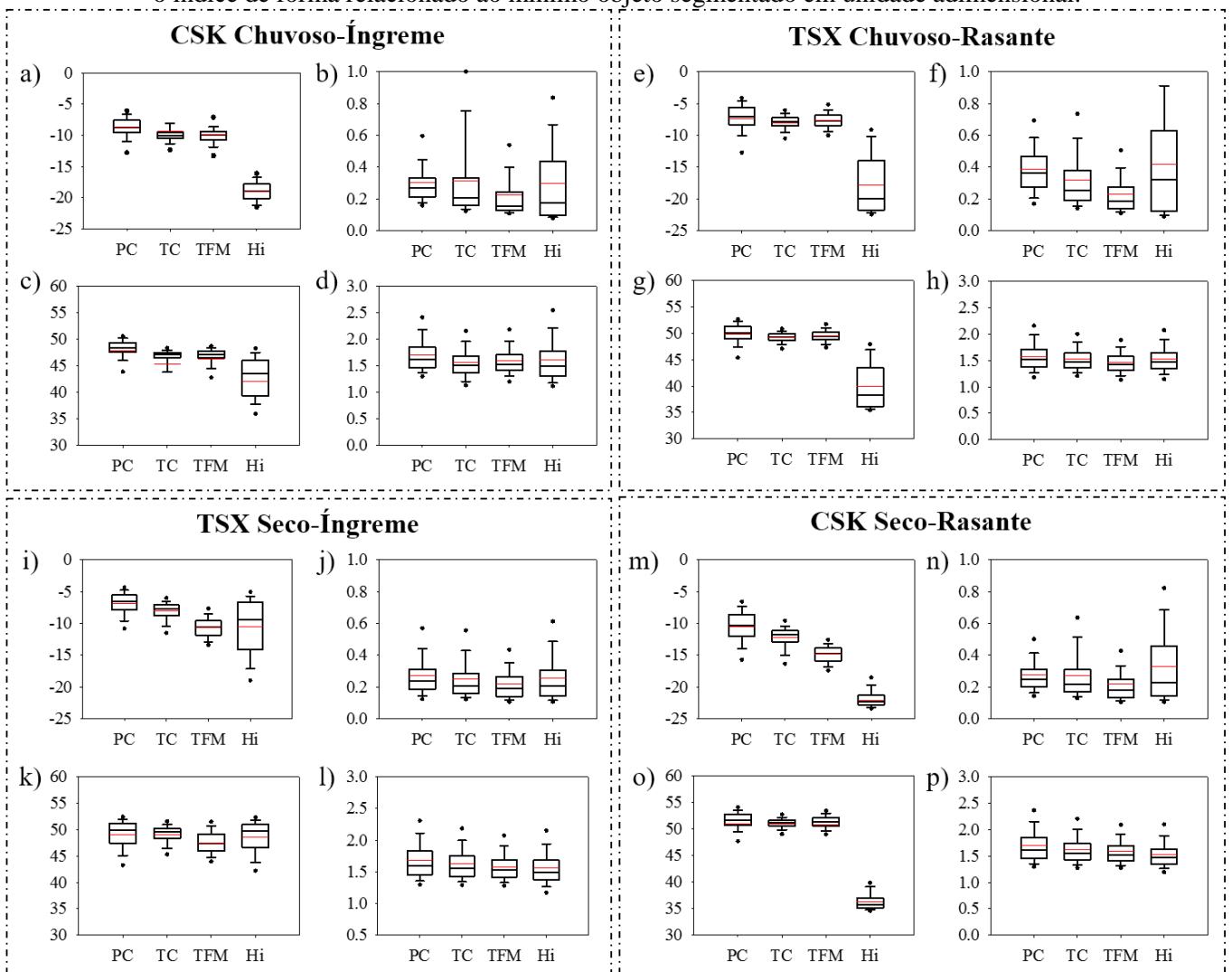
O TFM é formado por deposição de sedimentos inconsolidados recentes de origem fluvial, marinha e lacustre, é encontrado na zona de supramaré em cota topográfica superior a planície lamosa de intermaré e inferior ao planalto costeiro. A cobertura da terra é composta por vegetação campestre e manchas arbustivas. A cadência de inundação é dominada pela influência da hidrografia e chuvas durante a estação chuvosa, e, durante a estação seca por marés de sizígia (FRANÇA; SOUZA FILHO, 2006). A amplitude topográfica está entre 2 a 20 m com declividade plana a suave ondulada.

A Hi é a feição de mapeamento mais singular com presença majoritária em tons de cinza escuro, entretanto em áreas de águas rasas, deltas, canais de maré e na presença de ondas maiores sucedem tons de cinza claro. As formas da Hi variaram entre compactas alongadas a curvilíneas com textura fortemente lisa a ligeiramente rugosa. A Hi na porção estuarina da foz do Amazonas tem característica meândrica e dendrítica, com regime hidrodinâmico dominado pela descarga fluvial no período chuvoso e maior influência da salinidade no período seco, existindo constante fluxo e refluxo de macromarés, interações de ondas em NE-SW e derivas litorâneas N-S e S-N (EL-ROBRINI et al., 2006).

A distribuição estatística dos ambientes costeiros é disposta em *box plots* na Figura 32. É perceptível em síntese, a maior discriminação dos ambientes costeiros na Figura 32(a) e 32(m) durante a estação seca, pelo fato de haver menor sobreposição na dispersão dos conjuntos formados por 165 amostras de campo. De forma mais específica, ressalta-se o conjunto da

Figura 32(m) com menor dispersão e maior discriminação entre todos os tratamentos SAR, este adquirido em incidência rasante na ordem de $58,5^\circ$. As feições de Hi foram melhor discriminadas para com feições terrestres durante os períodos chuvosos, estes comportaram-se de forma singular no σ^0 e textura, apontados nos *box plots* da Figura 32 (a), (c), (e) e (g). Neste caso, a textura e CV foram a informação complementar necessária para separar a ambiguidade recorrente do σ^0 . De todos os atributos, a menor capacidade de discriminação para as classes analisadas foi perceptível no índice de forma, constante na Figura 32 (d), (h), (l) e (p), porém este atributo permitiu distinguir feições costeiras por meio de regras específicas de classificação orientada a objetos entre formas sinuosas e compactas ao resolver a ambiguidade no σ^0 .

Figura 32 - Caracterização dos ambientes costeiros amazônicos mapeados nas condições de estação chuvosa e seca para ângulos de incidência íngreme ($\theta < 35^\circ$) e rasante ($\theta \geq 35^\circ$). Os elementos (a), (e), (i) e (m) descrevem o atributo primário de coeficiente de retroespalhamento em escala logarítmica de decibéis (db). Os elementos (b), (f), (j) e (n) descrevem o coeficiente de variação em unidade adimensional no intervalo de [0; 1]. Os elementos (c), (g), (k) e (o) descrevem a textura média observada em todas as direções com unidade adimensional. Os elementos (d), (h), (l) e (p) descrevem o índice de forma relacionado ao mínimo objeto segmentado em unidade adimensional.

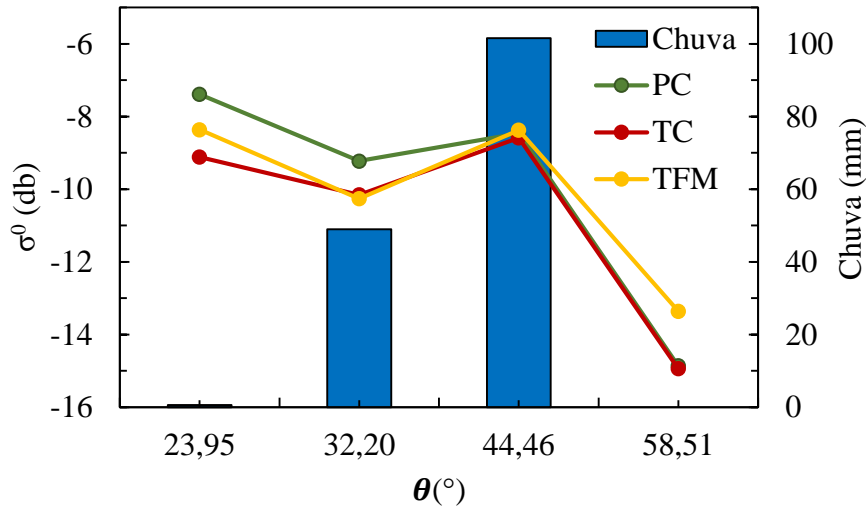


A PC obteve σ^0 médio na ordem de [-6,91; -10,53] db e desvio padrão de [1,95; 2,81] db, o TC com σ^0 médio de [-8,06; -12,22] db e desvio padrão de [1,61; 2,17] db, o TFM com σ^0 médio de [-7,71; -14,88] db e desvio padrão de [1,50; 1,78] db, e por último a Hi com σ^0 médio de [-10,50; -22,06] db e desvio padrão de [2,13; 4,77] db. As médias de σ^0 entre os ambientes costeiros compartilham muitos intervalos de ambiguidade e combinado a dispersão relativa elevada entre as amostras, como em pior caso notado para a PC e Hi, tornam o mapeamento morfológico com resultados em detrimento da exatidão temática, ao se basear apenas no sinal em amplitude, conforme reportado em estudos semelhantes na costa amazônica de Nascimento et al. (2013) e Souza-Filho et al. (2011) que recorreram a imagens óticas e polarização, respectivamente.

A dificuldade na discriminação pode ser ratificada pela maior variabilidade média no σ^0 ocorrente na PC com CV entre [0,27; 0,36]. Por outro lado, o TFM foi o ambiente costeiro mais homogêneo com CV de [0,10; 0,25], e conseqüentemente, mais discriminável. A textura denotou o indicativo da macrotopografia ao trazer realce entre bordas e vertentes das unidades de relevo de característica plano em baixas cotas (< 10 m na superfície topográfica), haja vista a intrínseca relação da variabilidade tonal do sinal condicionada ao comprimento de onda, resolução espacial e ângulo de incidência (HEROLD; HAACK; SOLOMON, 2004; PARADELLA et al., 2009).

As 165 observações coletadas em campo foram qualificadas por ambientes costeiros e tabulados com as respectivas aquisições de imagens SAR, assim, obteve-se o comportamento do σ^0 nos diferentes ângulos de incidência aliado aos dados de precipitação, e também, a relação com a informação de coerência interferométrica (Figura 33). Na Figura 33, ratificou-se a tendência de decréscimo do σ^0 com a diminuição do θ , mesmo em períodos do ano distintos, entretanto há uma inflexão acentuada no σ^0 para a aquisição do TSX sob incidência rasante (44,46°) no período chuvoso associado a forte precipitação acumulada na ordem de 101,60 mm. É esperado valores mais elevados de σ^0 para ângulos de incidência menores, haja vista incidir menor espalhamento especular (ULABY et al., 1982). Os períodos secos nas incidências íngreme (23,95°) e rasante (58,51°) confirmam a maior discriminação dos ambientes costeiros.

Figura 33 - Caracterização do coeficiente de retroespalhamento por ambientes costeiros para com as observações dos pontos de campo. As aquisições do TSX Íngreme Seco, CSK Íngreme Chuvoso, TSX Rasante Chuvoso e CSK Rasante Seco correspondem respectivamente aos ângulos de incidência (θ) de 23,95°, 32,2°, 44,46° e 58,51°.

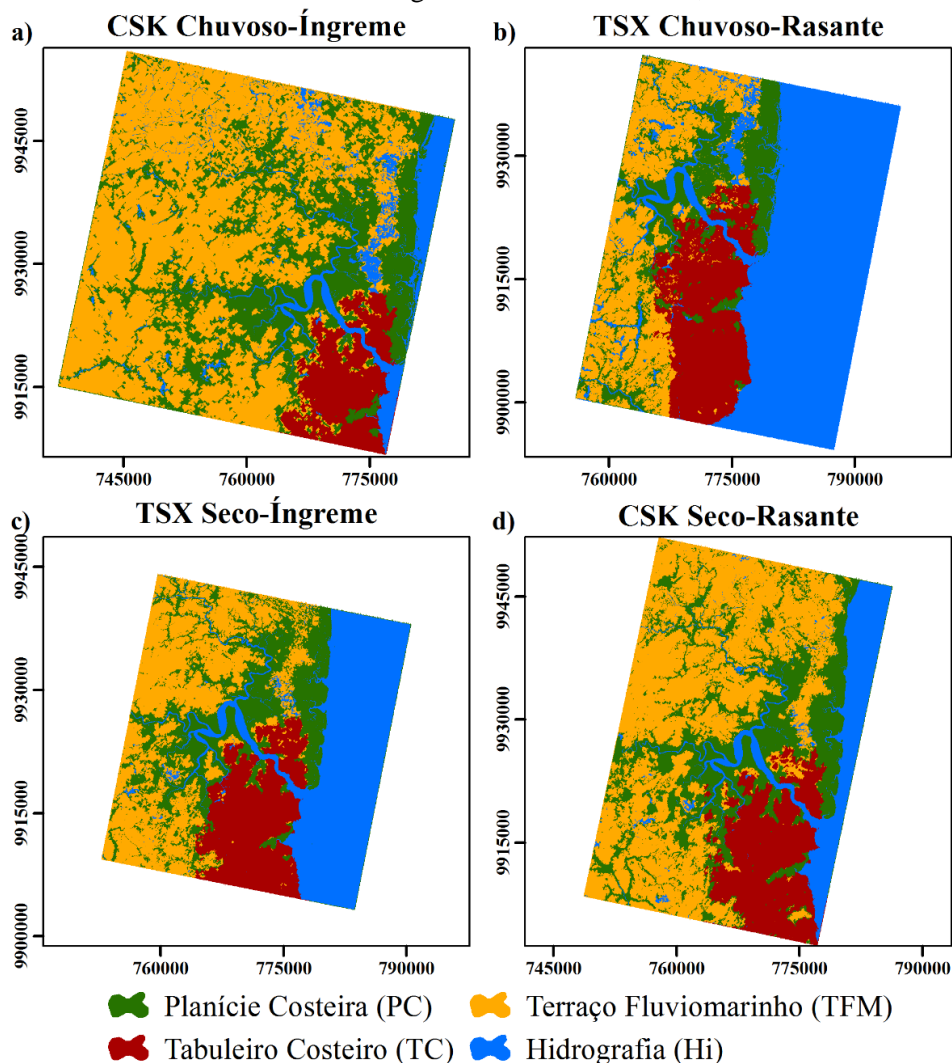


A análise do σ^0 exclusiva a uma única aquisição não permite discriminação inequívoca entre alvos presentes em zonas úmidas. Desta forma, é mandatório a combinação de estações do ano, diferentes comprimentos de onda (X, C e L), polarimetria completa e alta resolução espacial (menor que 10 m), para obter altas performances (maior que 80% de exatidão) de classificação como reportado nos estudo de Evans e Costa (2013) e Rebelo (2010). Estudos em ambientes úmidos vem demonstrando a adequabilidade da informação interferométrica e coeficiente de retroespalhamento para detectar feições distintas como demonstrado nos trabalhos de Antonova et al. (2016), Hall-Atkinson e Smith (2001) e Kim et al. (2013) e Xie et al. (2015).

Os estudos de Souza-Filho et al. (2011) e Trebossen et al. (2005) corroboram com a demanda por multisensores para descrever ambientes costeiros, onde as bandas de maior penetrabilidade (C e L) em polarização paralela VV são apropriadas para discriminar terra e água, todavia, o mapeamento costeiro requer melhorias em escalas espaço-temporais com maior detalhe, o que incluiria a observação de rios e canais em porções continentais sob influência salina e maré, zonas de erosão, deposição efêmera, migração de bancos arenosos e ilhas, deposição lamosa, assoreamento e desenvolvimento de mangues (EL-ROBRINI et al., 2006; MUEHE, 2005), além de, obter-se mais informação qualitativa proveniente de fase polarimétrica e interferométrica, pois de acordo com Ferretti et al. (2007) e Lee e Pottier (2009) amplia-se as possibilidades de caracterização e informação quantitativa da paisagem com técnicas de interferometria e polarimetria.

Os ambientes costeiros formaram uma área mapeada de 625,59 km². A PC alcançou uma área entre [183,63; 243,42] km² com disposição adjacente às drenagens por todas as cenas, e as porções mais extensas se concentraram ao longo da margem da baía de Marajó com orientação preferencial N-S. O TC alcançou uma área entre [139,70; 152,85] km² com disposição na margem leste da ilha de Marajó na orientação preferencial N-S. O TFM alcançou uma área entre [151,52; 198,53] km² com disposição centro-oeste e norte da área de estudo. A Hi alcançou uma área entre [79,38; 103,66] km², com distribuição ao longo de toda cena, é perceptível o controle estrutural das drenagens no sentido NW-SE, bastante explícito na principal drenagem da área de estudo (rio Paracauari), além das orientações W-E e NE-SW em acordo com os levantamentos de Costa et al., (2002). A disposição espacial dos ambientes costeiros amazônicos nos tratamentos abordados consta na Figura 34.

Figura 34 - Mapa de ambientes costeiros a partir dos dados CSK e TSX: a) CSK adquirido em 07/04/2016 e ângulo de incidência de 32,2°; b) TSX adquirido em 25/03/2016 e ângulo de incidência de 44,46°; c) TSX adquirido em 16/11/2016 e ângulo de incidência de 23,95°; e d) CSK adquirido em 31/10/2016 e ângulo de incidência de 58,51°.



5.2.4.3 *Detecção de Mudanças*

No processo de detecção de mudanças, as áreas de PC, TC, TFM e Hi foram observadas as mudanças para os estágios a priori correspondendo ao período chuvoso e os estágios a posteriori correspondendo ao período seco, com base nos mapas morfológicos derivados dos conjuntos CSK e TSX.

As mudanças nos ambientes costeiros amazônicos observadas no período de março a novembro de 2016 alcançaram os valores de área entre [147,54; 152,97] km², ou cerca de [23,59; 24,46] % do total mapeado dos conjuntos CSK e TSX. Os ambientes costeiros de maiores alterações foram a PC e TFM observados as mudanças em área da ordem de [39,27; 62,84] km² e [47,50; 71,63] km², respectivamente. No entanto, o ambiente costeiro mais estável foi TC observados as mudanças em área da ordem de [11,64; 16,79] km². A diferença final da classe no momento a priori e posteriori evidencia o balanço de acréscimo ou decréscimo na mesma. Desta forma, percebe-se nos conjuntos CSK e TSX, a diminuição da classe Hi na ordem de [-9,53; -20,73] km², o qual está provavelmente associado a inundação seguida de estiagem, processos erosivos na linha de costa e erros inerentes ao mapeamento. Computou-se a matriz de mudanças para sintetizar as alterações nos ambientes costeiros nos conjuntos CSK e TSX (Tabela 16).

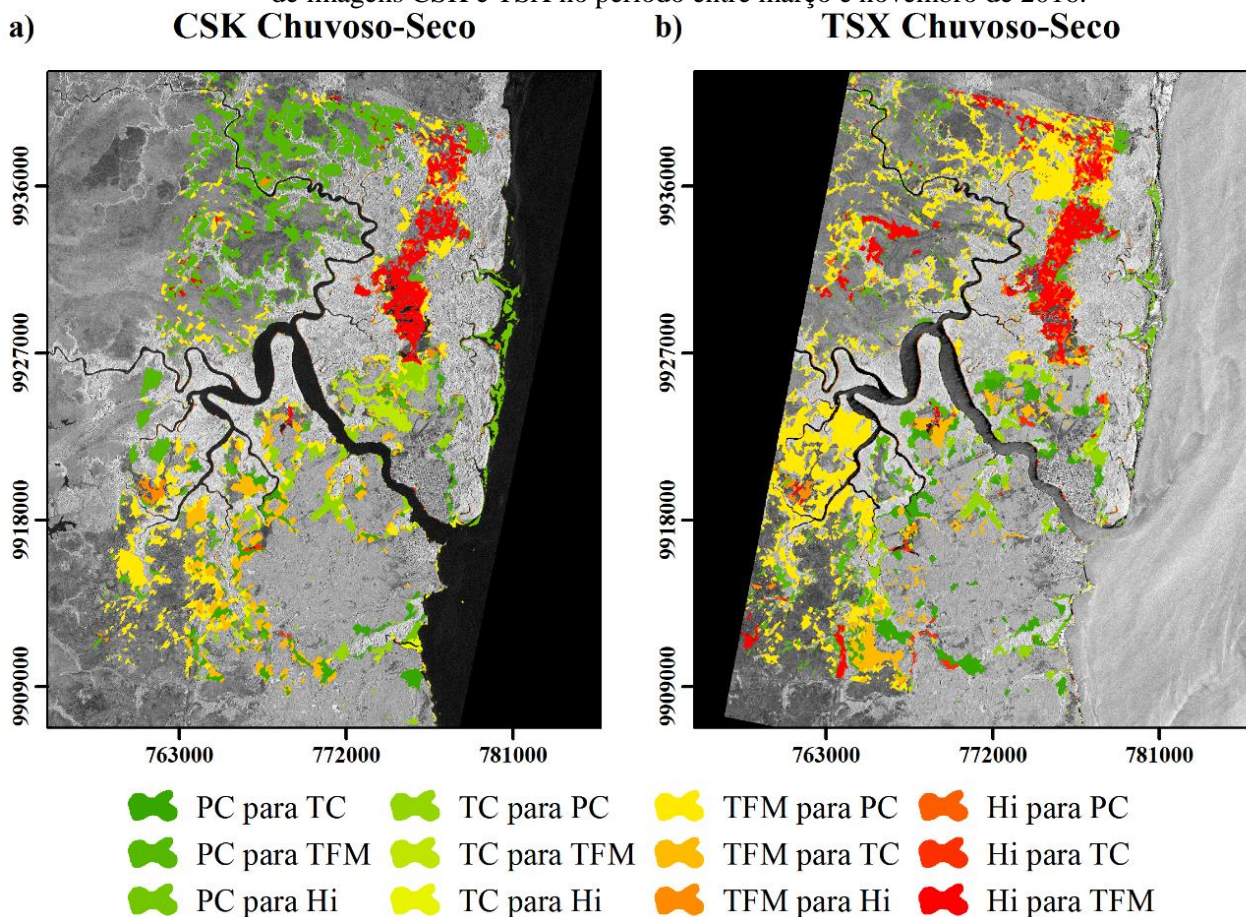
Tabela 16 - Matriz de Mudanças para os mapeamentos de ambientes costeiros amazônicos em estágio inicial chuvoso e estágio final seco, utilizando os conjuntos de dados CSK e TSX.

CSK		Inicial Chuvoso									
		PC		TC		TFM		Hi		Total	
		km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Final Seco	PC	180,60	74,19	9,55	6,75	30,95	20,42	5,22	5,86	226,34	100
	TC	9,93	4,08	124,60	88,13	14,76	9,74	0,68	0,77	150,04	100
	TFM	45,21	18,57	5,85	4,14	104,09	68,67	14,50	16,28	169,70	100
	Hi	7,70	3,16	1,39	0,98	1,78	1,17	68,64	77,08	79,51	100
	Total	243,45	100	141,39	100	151,59	100	89,05	100		
	Mudanças	62,84	25,81	16,79	11,88	47,50	31,33	20,41	22,92		
	Diferença	-17,10	-7,03	8,65	6,12	18,11	11,95	-9,53	-10,71		
TSX		Estágio Inicial Chuvoso									
		PC		TC		TFM		Hi		Total	
		km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Final Seco	PC	144,38	78,62	7,77	5,56	58,76	29,58	9,54	9,22	220,48	100
	TC	12,48	6,79	128,06	91,67	10,54	5,31	1,81	1,75	152,88	100
	TFM	20,27	11,04	3,04	2,17	127,02	63,94	19,07	18,42	169,42	100
	Hi	6,52	3,55	0,83	0,60	2,33	1,17	73,11	70,61	82,81	100
	Total	183,65	100	139,69	100	198,64	100	103,54	100		
	Mudanças	39,27	21,38	11,64	8,33	71,63	36,06	30,43	29,39		
	Diferença	36,82	20,05	13,19	9,44	-29,22	-14,71	-20,73	-20,02		

A detecção de mudanças apresentou dois momentos: i) está relacionado a estabilidade do TC como um ambiente de terra firme mais resistente ao intemperismo e erosão, e a instabilidade a processos de erosão e inundação dos ambientes costeiros da PC e TFM, em função a dinâmica do regime de chuvas e marés intrínsecos a estas paisagens, como citado nos estudos de França e Souza-Filho, (2003), França e Souza Filho (2006) e Guimarães et al., (2014); ii) os mapas morfológicos trazem consigo os erros do mapeamento provenientes de ruídos, filtragem, geocodificação, segmentação, limiares de classificação, registro da detecção de mudanças e outros, portanto, parte das áreas detectadas como mudanças são feições de falso positivo e falso negativo; e iii) as mudanças dos ambientes costeiros detectadas tem relação com as condições ambientais diferentes em cada momento de aquisição que alterou as propriedades dos alvos.

As ocorrências de mudanças costeiras foram mais presentes nas porções centro-norte, oeste marcados mais significativamente por áreas de inundação, e na mesma forma, ao longo das drenagens e nos ambientes sobre influência de maré e correntes associado a variações de linha de costa (Figura 35).

Figura 35 - Mapa de detecção de mudanças para os ambientes costeiros de Planície Costeira (PC), Tabuleiro Costeiro (TC), Terraço Fluviomarinho (TFM) e Hidrografia (Hi), observados os conjuntos de imagens CSK e TSX no período entre março e novembro de 2016.



Apesar da alta dinamicidade entre os pares CSK e TSX amostrados neste estudo, percebe-se que para escalas maiores o balanço sedimentar é erosivo a equilibrado, isto está em consonância aos estudos de França, Souza-Filho (2003), Guimarães et al. (2014), Santos (2006) e Souza Filho, Farias Martins, Da Costa (2006). Entretanto, sob a perspectiva de escalas menores aplicadas a toda área de influência da pluma de sedimentos do rio Amazonas a tendência em manguezais é acrescional (ANTHONY et al., 2010; NASCIMENTO et al., 2013).

Muehe (2005) afirma que os principais agentes de mudanças costeiras na costa lamosa amazônica são a descarga hídrica/sólida congregada a correntes de maré direcionadas a oceano aberto. Na mesma forma os estudos de Santos (2006) e de Batista, Souza Filho, Silveira (2009) mencionam porções da costa amazônica com mudanças de tendência erosiva nos últimos 30 anos com franca dinâmica em frentes oceânicas. Recentemente, Qi et al. (2015) demonstraram que técnicas contemporâneas de detecção de mudanças com imagens SAR, os quais se utilizam de pilhas de imagens multitemporais (compilação de cenas em passagem repetida) filtradas e corrigidas em nível de subpixel, são capazes de registrar tênues mudanças no sinal em amplitude e fase, entretanto este estudo foi aplicado no sul da China, em uma região costeira formada por um delta, em clima temperado e cobertura da terra bastante modificada por urbanização e agricultura.

5.2.4.4 Acurácia Temática do Mapeamento de Ambientes Costeiros

A condição de separabilidade entre os atributos SAR não foi considerada boa, visto que não obteve valores acima de 1,9 para o coeficiente JM em todos os ambientes costeiros, apenas o coeficiente DT obteve valores razoáveis e bons entre os pares das classes TFM para com PC e TC. Observou-se inseparabilidade com coeficientes JM e DT abaixo de 1,0 entre as classes de PC e TC. Nesta análise, as informações espectrais de σ^0 e os atributos derivados de CV e textura mostraram-se pouco eficazes para solucionar as ambiguidades recorrentes entre as feições segmentadas no processo de classificação (Tabela 17). É destacável na abordagem espacial definida para os ambientes costeiros que não há predominância radiométrica de um único alvo, logo os objetos mapeados em um tipo de ambiente costeiro congregam uma variedade de alvos retroespalhadores.

Tabela 17 - Matriz de separabilidade a partir das informações de σ^0 , CV e textura extraídas para os 165 ICPs coletados nos ambientes costeiros amazônicos.

CSK	Chuvoso-Íngreme						TSX	Chuvoso-Rasante					
	PC		TC		TFM			PC		TC		TFM	
	JM	DT	JM	DT	JM	DT		JM	DT	JM	DT	JM	DT
PC	-	-	0.61	0.76	1.17	1.98	PC	-	-	0.53	0.62	1.06	1.83
TC	0.61	0.76	-	-	1.44	2.00	TC	0.53	0.62	-	-	0.91	1.35
TFM	1.17	1.98	1.44	2.00	-	-	TFM	1.06	1.83	0.91	1.35	-	-
TSX	Seco-Íngreme						CSK	Seco-Rasante					
	PC		TC		TFM			PC		TC		TFM	
	JM	DT	JM	DT	JM	DT		JM	DT	JM	DT	JM	DT
PC	-	-	0.45	0.51	0.51	0.58	PC	-	-	0.37	0.45	1.23	1.94
TC	0.45	0.51	-	-	0.79	0.97	TC	0.37	0.45	-	-	1.55	2.00
TFM	0.51	0.58	0.79	0.97	-	-	TFM	1.23	1.94	1.55	2.00	-	-

Isto demonstra a dificuldade da banda X em polarização paralela HH em discriminar espectralmente ambientes costeiros, especificamente as classes de PC e TC. Em adição, os mecanismos de retroespalhamento são majoritariamente distintos em ângulos de incidência estreitos a largos. Nas feições terrestres vegetadas, predominam os mecanismos de espalhamento superficial com característica especular e difusa, propiciando maior ambiguidade entre os objetos, e até mesmo espalhamento múltiplo resultante da interação do senoide da banda X com folhas e ramos (ULABY et al., 1982).

As aplicações da banda X e C em zonas úmidas com única aquisição tem prejuízo na capacidade de discriminação temática, igualmente verificado por Betbeder et al. (2015) e Reschke et al. (2012). A alternativa proposta por estes estudos é utilizar séries temporais a partir de 5 aquisições ao longo das estações do ano e no mínimo polarização dupla em paralelo e cruzado. A eficácia na discriminação de alvos em zonas úmidas por σ^0 , textura e polarimetria completa são ratificados nos estudos Furtado et al (2016) e Kumar e Patnaik (2013).

Os mapas de ambientes costeiros obtiveram desempenho considerado bom, com exatidão global entre [66,89; 69,93] % e coeficiente *Kappa* entre [0,46; 0,51], mediante a comparação com a referência de 165 PCIs coletados com receptor GNSS. O melhor desempenho temático sucedeu para os dados adquiridos com CSK sob ângulo de incidência rasante e na estação seca, opostamente estiveram os dados adquiridos com CSK sob ângulo de incidência íngreme e na estação chuvosa. O ambiente costeiro de melhor desempenho perante o classificador foi a PC com acurácia do produtor entre [84,38; 91,23] %. Todavia, a pior performance perante o classificador ocorreu com o TFM com acurácia do produtor entre [15,63; 27,27] %. A maior confusão temática ocorreu entre o TFM e TC ao se observar os erros de comissão e omissão na ordem de [72,73; 84,38] % e [35,00; 40,91] %, respectivamente (Tabela 18).

Tabela 18 - Matriz de Confusão para o mapeamento de ambientes costeiros utilizando os dados CSK e TSX sob as condições de estação chuvosa e seca para ângulos de incidência de caráter íngreme ($\theta < 35^\circ$) e rasante ($\theta \geq 35^\circ$).

CSK	Chuvoso-Íngreme					
	PC	TC	TFM	Σ Linha	Comissão	Usuário
PC	54	12	9	75	28,00%	72,00%
TC	8	40	18	66	39,39%	60,61%
TFM	2	0	5	7	28,57%	71,43%
Σ Coluna	64	52	32			
Omissão	15,63%	23,08%	84,38%			
Produtor	84,38%	76,92%	15,63%			
Exatidão Global = 66,89%			Coefficiente Kappa = 0,46			
TSX	Chuvoso-Rasante					
	PC	TC	TFM	Σ Linha	Erro de Comissão	Usuário
PC	54	12	8	74	27,03%	72,97%
TC	9	38	15	62	38,71%	61,29%
TFM	0	1	6	7	14,29%	85,71%
Σ Coluna	63	51	29			
Omissão	14,29%	25,49%	79,31%			
Produtor	85,71%	74,51%	20,69%			
Exatidão Global = 68,53%			Coefficiente Kappa = 0,48			
TSX	Seco-Íngreme					
	PC	TC	TFM	Σ Linha	Comissão	Usuário
PC	49	11	5	65	24,62%	75,38%
TC	6	39	21	66	40,91%	59,09%
TFM	0	3	7	10	30,00%	70,00%
Σ Coluna	55	53	33			
Omissão	10,91%	26,42%	78,79%			
Produtor	89,09%	73,58%	21,21%			
Exatidão Global = 67,38%			Coefficiente Kappa = 0,48			
CSK	Seco-Rasante					
	PC	TC	TFM	Σ Linha	Comissão	Usuário
PC	52	13	8	73	28,77%	71,23%
TC	5	39	16	60	35,00%	65,00%
TFM	0	1	9	10	10,00%	90,00%
Σ Coluna	57	53	33			
Omissão	8,77%	26,42%	72,73%			
Produtor	91,23%	73,58%	27,27%			
Exatidão Global = 69,93%			Coefficiente Kappa = 0,51			

Ao considerar os valores de Exatidão Global e *Kappa* não há diferença de performance para as imagens TSX com [68,38; 67,38]% e 0,48, respectivamente. Já nas imagens CSK ocorreu ganho de performance da aquisição no período chuvoso e ângulo de incidência íngreme para período seco e ângulo de incidência rasante com [66,89; 69,93]% e [0,46; 0,51], respectivamente.

Para a acurácia temática é importante enfatizar três aspectos dos ambientes costeiros: i) o conjunto de regras e parâmetros da classificação orientada a objetos conseguiu mapear

satisfatoriamente as classes de PC, TC, TFM e Hi; ii) a caracterização espectral das classes por meio do σ^0 , CV e textura melhoraram a identificação no mapeamento ainda que houvesse distintos ângulos de incidência e estações do ano; e, iii) as inconformidades entre os tratamentos utilizados demonstraram maior dificuldade na classificação inequívoca entre os ambientes costeiros de TFM e TC, o que sugere proceder aquisições no período seco sob incidência rasante para alcançar maior desempenho temático.

Estudos de Nascimento et al. (2013), Souza-Filho et al. (2011) e Teixeira (2011) para mapeamento geológico-geomorfológico na costa amazônica alcançaram coeficientes *Kappa* entre 0,66 a 0,91, utilizando dados SAR em diferentes incidências, polarização completa e auxiliados por imagens ópticas. De fato, nesse estudo há um detrimento para com a acurácia temática com *Kappa* entre 0,48 a 0,51, fato este que pode estar relacionado a uma abordagem unicamente governada por dados SAR monocromáticos de polarização simples em diferentes estações do ano e sob incidência variável entre íngreme e rasante.

É destacável a aplicação presente nesse estudo para os tratamentos da cadeia SAR em amplitude, sob curto período de tempo e diferentes ângulos de incidência, pois assim foi possível apontar direcionamentos acerca da geometria de aquisição SAR em ambientes costeiros amazônicos.

5.2.5 Conclusões

Este estudo apresenta uma abordagem para mapeamentos morfológicos e detecção de mudanças na Zona Costeira Amazônica, baseado em dados SAR de amplitude na banda X em incidências íngremes e rasantes, para um período de seis meses. Especificamente no estudo de caso desenvolvido, esta abordagem alcançou desempenho satisfatório para a discriminação, mapeamento e detecção de mudanças dos ambientes costeiros.

Os dados CSK e TSX, respectivamente provenientes da ASI e DLR, foram adquiridos em geometrias díspares, o que não propiciou distorções geométricas severas no relevo costeiro amazônico, e assim, foi possível aplicar a cadeia SAR em amplitude, com plena aplicabilidade ao mapeamento morfológico. O tratamento por calibração, filtragem, geocodificação, coeficiente de retroespalhamento, coeficiente de variação, textura extraída de GLCM e classificação orientada a objetos demonstrou ganho qualitativo na análise da variabilidade do sinal e desempenho da acurácia temática, sendo que as melhorias nos parâmetros estatísticos ocorreram em ângulo de incidência rasante e estação seca.

A separabilidade das classes por meio dos atributos SAR foi considerada boa entre as unidades morfológicas da Planície Costeira e Tabuleiro Costeiro em relação ao Terraço Fluviomarinho. Entretanto, entre Planície Costeira e Tabuleiro Costeiro, houve pouca separabilidade e, portanto, dificuldade de discriminação.

As mudanças costeiras foram mais presentes nas porções centro-norte e oeste, marcadas mais significativamente por áreas de inundação, e na mesma forma, ao longo das drenagens e nos ambientes sobre influência de maré e correntes associado a variações de linha de costa.

Quanto a acurácia temática, enfatiza-se três aspectos dos ambientes costeiros: i) o conjunto de regras e parâmetros da classificação orientada a objetos conseguiu mapear as classes de Planície Costeira, Tabuleiro Costeiro e Terraço Fluviomarinho com desempenho satisfatório para o coeficiente *Kappa*; ii) a caracterização espectral das classes por meio do coeficiente de retroespalhamento melhorou a identificação dos ambientes, embora com ângulos de incidência diferentes de incidências íngremes ($\theta < 35^\circ$) a rasante ($\theta \geq 35^\circ$); e, iii) as inconformidades entre os tratamentos utilizados demonstraram maior dificuldade na classificação inequívoca entre os ambientes costeiros de Terraço Fluviomarinho e Tabuleiro Costeiro.

As fontes de informação em microondas precisam ser ampliadas para a banda L e/ou P de maior penetrabilidade em condição polarimétrica com uso do sinal complexo em amplitude e fase, estes comprimentos de onda apresentam menor saturação para a biomassa em florestas densas e manguezais recursivos nos ambientes costeiros amazônicos, o que propicia utilizar atributos de coeficiente de retroespalhamento, coeficiente de variação e textura em uma maior variabilidade e capacidade de discriminação.

5.3 Elaboração de MDS por Interferometria SAR

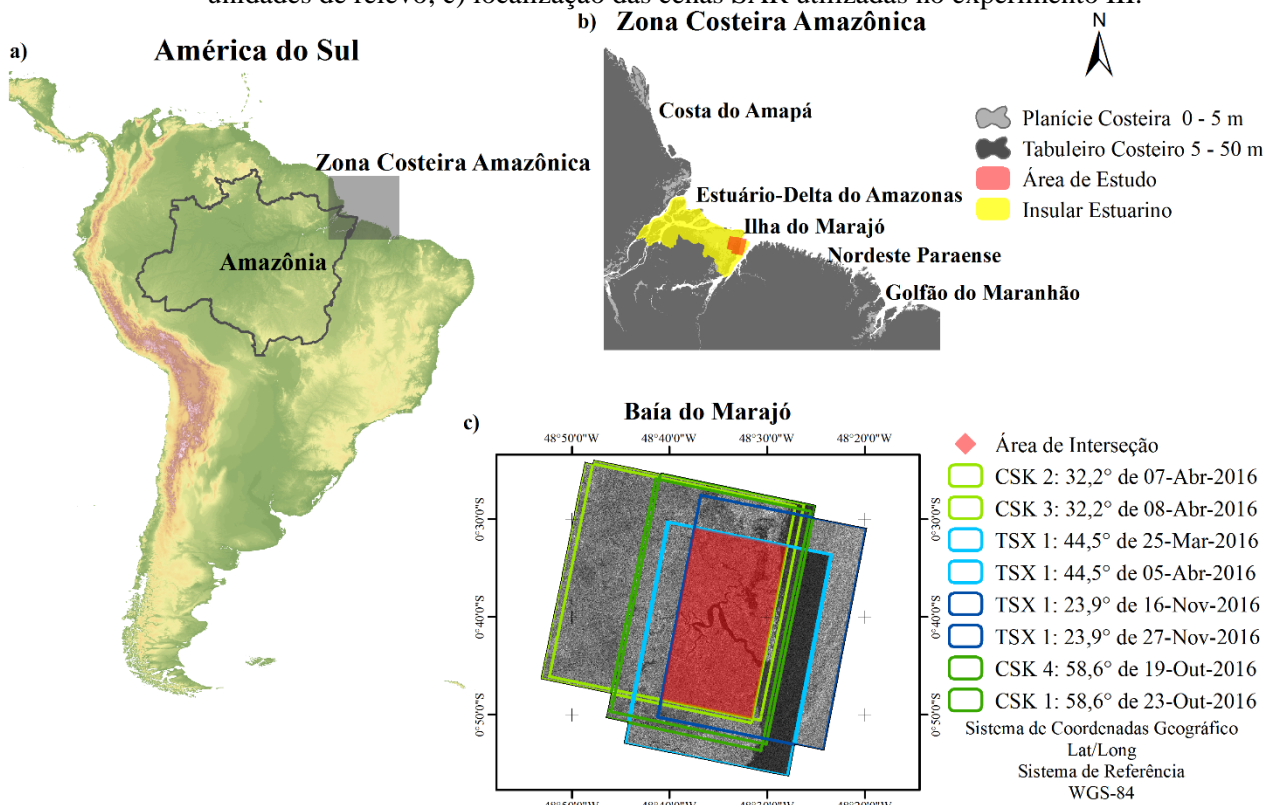
5.3.1 Objetivo

Este experimento contribuiu nos estudos da ZCA em aplicar interferometria SAR para elaboração de MDSs no relevo plano e dinâmico, e avaliar a acurácia vertical dos MDSs, ao considerar a geometria de aquisição íngreme ($\theta < 35^\circ$) e rasante ($\theta \geq 35^\circ$), durante as estações chuvosa e seca. Além disso, foi observada a relação entre o tipo de ambientes costeiro e a acurácia vertical.

5.3.2 Área de Estudo

A dinâmica de variações de linha de costa foi considerada na especificação da área do experimento III, que face à característica de mapeamento temporal, foi delineada pela interseção das faixas de imageamento SAR, definidas pelas órbitas descendentes dos satélites CSK e TSX. Estas oito cenas SAR cobrem a borda leste da Ilha de Marajó, na margem esquerda da Baía de Marajó e dentro do setor Insular Estuarino da ZCA (Figura 36).

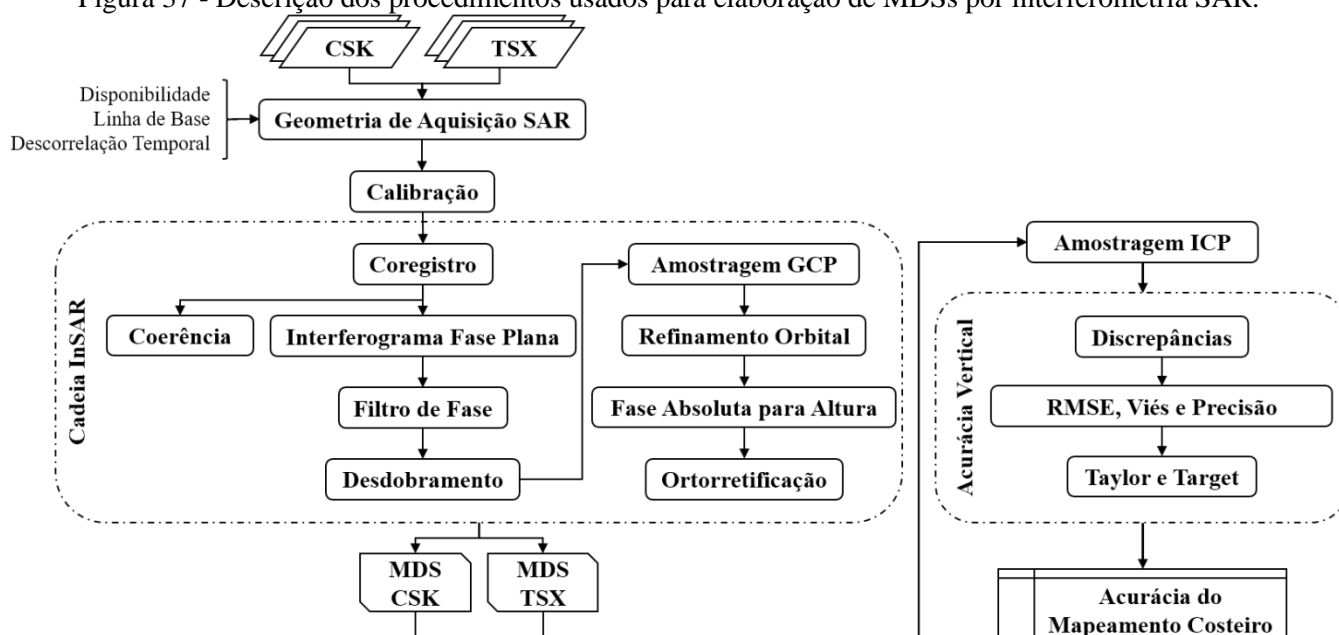
Figura 36 - a) Localização da zona costeira amazônica; b) compartimentos da costa amazônica com unidades de relevo; c) localização das cenas SAR utilizadas no experimento III.



5.3.3 Método

Este experimento teve como foco: i) executar a cadeia de interferometria SAR para elaborar MDS (ESA, 2015; FERRETTI et al., 2007; PASQUALI et al., 2012; SARMAP, 2016a, 2016b); e ii) analisar estatísticas de avaliação de acurácia vertical para os MDSs interferométricos em seus respectivos tratamentos e ambientes costeiros (CONGALTON; GREEN, 2009; GALO; CAMARGO, 1994; JOLLIFF et al., 2009; TAYLOR, 2001). Os procedimentos realizados nesta etapa são mostrados abaixo na Figura 37.

Figura 37 - Descrição dos procedimentos usados para elaboração de MDSs por interferometria SAR.

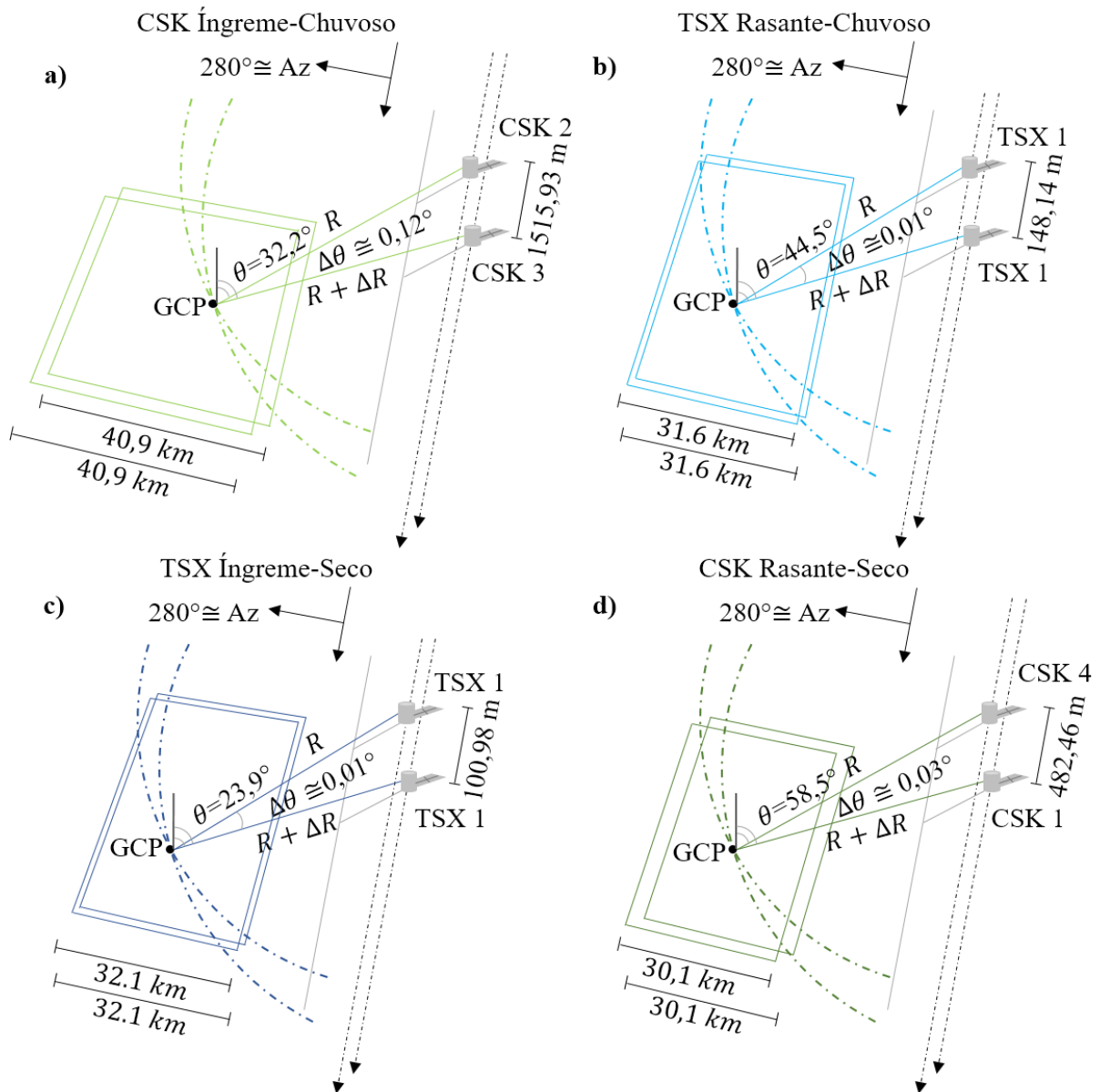


5.3.3.1 Geometria de Aquisição SAR

A reconstrução tridimensional da superfície por interferometria está estritamente relacionada a dois parâmetros de aquisição dos sistemas SAR: i) a defasagem temporal na aquisição das cenas, o que implica no grau de correlação do sinal complexo de radar conjugados no par interferométrico; e, ii) a linha de base espacial, definida pela localização das observações a qual incide na resolução vertical altimétrica ou na perda da razão sinal e ruído. Observações com defasagens temporais longas aumentam o ruído em prejuízo da coerência, especificamente, para coberturas da terra por vegetação e/ou feições influenciadas por mudanças no conteúdo de água. Linhas de base espaciais pequenas têm sensibilidade altimétrica associada à resolução vertical, entretanto, se esta distância for muito menor que o suportado na linha de base crítica, ocorrem perdas na relação sinal-ruído da fase que são sujeitas a interferências da troposfera. Linhas de base espaciais muito longas prejudicam a coerência interferométrica, especificamente em relevos acidentados e ambientes com espalhamento volumétrico, o que resulta em excessivo ruído e são mais complexas para realizar o desdobramento do interferograma (BAMLER; HARTL, 1998; FERRETTI et al., 1999; MURA, 2001; WEGMÜLLER et al., 2009).

A seleção de pares interferométricos é determinante no tratamento dos dados pelo fato de se admitir a revisita com a menor defasagem temporal possível, para uma similar geometria de aquisição exequível pelas plataformas CSK e TSX, e ainda, as condições de relevo e ambientais da área da ZCA. Em adição, o nível de processamento SLC é pré-requisito por possibilitar acesso as informações reais e imaginárias do dado SAR em plena performance de resolução espacial em alcance e azimute. Os dados SLC contemplam informações auxiliares de vetor de estado e calibração, e estes, por sua vez são parâmetros fundamentais para a aplicação de equações Range-Doppler e obtenção do coeficiente de retroespalhamento com devido equacionamento referenciado pelos provedores de dados SAR. As geometrias de aquisições interferométricas foram definidas em 4 tratamentos (configurações), correspondendo as aquisições SAR Íngreme-Chuvosa na Figura 38(a), Rasante-Chuvosa na Figura 38(b), Íngreme-Seca na Figura 38(c) e Rasante-Seca na Figura 38(d), estes de acordo com a estação climática do ano, e o ângulo de incidência que corresponde a íngreme ($\theta < 35^\circ$) e rasante ($\theta \geq 35^\circ$).

Figura 38 - Geometria de aquisição SAR interferométrica para os tratamentos no período chuvoso e seco e incidência íngreme ($\theta < 35^\circ$) e rasante ($\theta \geq 35^\circ$).



5.3.3.2 Cadeia de Processamento Interferométrico

A aquisição dos pares sob mesma incidência determina a cadeia de interferometria SAR, cuja a configuração de passagem única é utilizada em fins de mapeamento do terreno (topográfico e temático), e, a passagem múltipla tem aplicações específicas em detecção de mudanças, perfis temporais, deformações do terreno como soerguimento ou subsidência do terreno (PARADELLA et al., 2012).

A seleção de imagens é determinante no tratamento dos dados pelo fato de se admitir a revisita interferométrica com a menor defasagem temporal, e a linha de base espacial mais

consistente para uma mesma geometria de aquisição entre as plataformas de radar. Além disto, o nível de processamento SLC é pré-requisito por possibilitar acesso aos dados de amplitude e fase na estrutura complexa do dado SAR com plena performance de resolução espacial em alcance e azimute e auxílio das informações de efemérides da plataforma. Ferretti et al. (2007) declaram que a seleção de imagens é a etapa chave e tem forte impacto na qualidade dos processamentos interferométricos. Em adição, os mesmos autores expuseram os critérios para escolha de pares interferométricos, tais como: i) direção de visada (passagens ascendentes e descendentes); ii) linha de base espacial; iii) linha de base temporal; iv) período de aquisição; v) coerência; vi) condições meteorológicas.

O principal meio de correção geométrica de pares interferométricos ocorre por equações *Range-Doppler* que consideram a plataforma (vetor de estado), formação da imagem complexa de radar (alcance inclinada e alcance no terreno), terreno e representação cartográfica (*datum* e projeção). Na ausência de informações precisas de órbita, ainda assim, é possível aplicar equações *Range-Doppler* baseado no deslocamento entre o par na direção azimutal ao longo do trajeto da plataforma (GOBLIRSCH; PASQUALI, 1996). A aplicação de órbitas precisas é extremamente necessária para refinar o cálculo do vetor de estado das plataformas satelitais na aplicação de interferometria SAR, o que retorna efemérides acuradas de posição e velocidade, com melhorias significativas no computo da contribuição da diferença de fase (REIGBER et al., 1996; WERMUTH et al., 2012).

O co-registro é um tratamento crítico dentro das técnicas de interferometria SAR por relacionar células de resolução de uma mesma feição entre um conjugado de imagens mestre e escravas, de modo a satisfazer um nível de acurácia ao nível de subpixel em uma abordagem de ajuste inicial grosseiro a fino (MURA, 2001). O co-registro garante que cada contribuição de alvos no terreno advenha da mesma célula de resolução em alcance e azimute, para as imagens mestre e serva (FERRETTI et al., 2007). Hellwich (1999) sugere que a precisão do co-registro deve ser inferior a décima parte da extensão linear da amostragem no terreno. Nitti et al. (2011) consideram que o co-registro aplicado em relevos acidentados e longas linhas de base, especificamente no comprimento de onda em banda X, requer a solução de ajustamento do par interferométrico com assistência de um MDE prévio para obter melhorias significativas no alinhamento. No co-registro dos pares interferométricos foi aplicado com algoritmo automático assistido pelo MDE do SRTM o qual se encarregou de selecionar GCP de alta coerência ao utilizar um operador de janela móvel nas células com sobreposição do sinal em amplitude e fase, e assim, estipulou-se como critério a correlação radiométrica dos sinais conjugados determinada por um limiar de aceitação a priori.

A partir do conjunto complexo conjugado de imagens de radar coregistradas (InSAR *stack*), estes se apresentando com ou sem referência de fase na superfície terrestre, pode-se fazer a estimativa da coerência interferométrica, a qual foi baseado na correlação espacial de sinais complexos de radar estimados por um operador de média móvel. A coerência interferométrica foi estimada entre 0 a 1, onde valores mais próximos do máximo ($|\gamma| = 1$) indicam que o padrão de valores complexos de todos os N pixels são completamente correlacionados, ao passo que no outro extremo ($|\gamma| = 0$) os sinais complexos são descorrelacionados e considerados incoerentes (WOODHOUSE, 2006).

A partir dos interferogramas em fase dobrada, retira-se as influências de deslocamento da linha de base, a fase plana do terreno e a contribuição orbital para estimar a fase absoluta do interferograma no processo denominado de desdobramento da fase. O desdobramento soluciona a continuidade bidimensional do interferograma dobrado, partindo dos valores entre $-\pi$ a $+\pi$ para valores reconstruídos da integral da fase derivada, de forma consistente e contínua. Os principais métodos de desdobramento estão divididos em métodos locais, com destaque ao processo de crescimento de regiões, e, os métodos globais com destaque para os mínimos quadrados (FERRETTI et al., 2007; OSMANOĞLU et al., 2016). Recentemente, os desdobramentos de fase que se utilizam de abordagens 3D (espaço e tempo) tem melhores resultados qualitativos do que aquisições 2D (espaço) (CROSETTO et al., 2016).

Para se obter a elevação ortométrica foi necessário o processamento de refinamento orbital seguido da conversão entre fase absoluta e altimetria. O refinamento orbital foi crucial por definir parâmetros adequados de transformação entre a fase absoluta no interferograma desdobrado em elevações ou deslocamentos no terreno, de modo que permitisse refinar efemérides e calcular o resíduo da fase estimada (*offset*). Coletou-se 12 GCP em projeção de alcance inclinado que corresponderam a coordenadas projetadas no terreno com cota ortométrica proveniente dos levantamentos de campo no período da estiagem.

A etapa final de processamento interferométrico para elaboração de MDE foi a conversão de fase absoluta para altimetria ou deslocamento, e, a geocodificação por meio da aplicação de equações *Range-Doppler* com resolução dos MDS interferométricos de 12 m ao projeta-los para UTM zonal Sul e referência WGS-84.

5.3.3.3 Acurácia Vertical

Os MDSs elaborados pelos conjuntos de dados CSK e TSX, para os respectivos modelos interferométricos, foram avaliados quanto à acurácia vertical de acordo com os testes

estatísticos pareados com a altitude ortométrica obtidas de levantamento GNSS que proporcionaram estimar discrepâncias, viés e precisão. Em adição, foram feitas etapas finais para verificar os principais parâmetros estatísticos que tem correspondência com a precisão vertical em ordem e categorização, por meio dos diagramas de Taylor e Target, estes aplicados a partir dos MDS e ambientes costeiros amazônicos correspondentes.

A avaliação da acurácia vertical é relevante para atribuir o nível de incerteza relativo ao processo de elaboração de MDS, e assim, considerar o potencial ou restrição do produto cartográfico (CONGALTON; GREEN, 2009). Para tanto, utilizou-se o PEC que é o instrumento legal criado pelo governo brasileiro para estabelecer padrões nos mapas cartográficos, e este por sua vez, recebeu contribuições e atualizações para melhorar o rigor de precisão, a luz das recentes tecnologias de mapeamento, o que materializou-se na especificação técnica para aquisição de dados geoespaciais PEC-PCD (DSG, 2016). O PEC-PCD é um indicador de dispersão estatística para erros aleatórios toleráveis em 90% das amostras mapeadas, ao se contestar uma fonte de mapeamento confiável, de modo que se define a precisão categorizada nas classes A, B, C e D (qualidade cartográfica em ordem alfabética) e escala cartográfica desde 1:1000 até 1:250000.

O passo crítico para realizar a precisão posicional foi a amostragem de ICP. A DSG (2016) recomenda 20 ICPs, no entanto, foram utilizadas 40 observações GNSS, com a precisão posicional centimétrica de . Estas observações GNSS de referência foram contrapostos à resolução espacial nominal de 3 metros no nível primário SLC e erro de geolocalização provenientes das plataformas, no pior caso está em 15 m para o nível ortorretificado, segundo as especificações técnicas do CSK e TSX (ASI, 2016b; DLR, 2013).

As análises de viés e precisão compreenderam os cálculos de discrepância (ΔZ) pela diferença entre a altura estimada (Z_{est}) e medida (Z_{med}), o número total de pares (n), a média ($\overline{\Delta Z}$) e o desvio padrão ($\sigma_{\Delta Z}$) do erro, e por fim, o RMSE. Esses parâmetros estatísticos suportaram os testes T-Student e Qui-Quadrado para o nível de confiança de 90% com intenção de testar os requisitos e limiares do PEC-PCD na proposta de abordagem descrita por Galo e Camargo (1994). Congalton e Green (2009) descrevem o RMSE como a medida de erro média contrabalançado por valores positivos e negativos. O RMSE pode derivar o erro linear em 90% de nível de confiança (LE90), este é uma expectativa estatística para comportamento de erro no produto cartográfico, conforme as formulações a seguir:

$$\left\{ \begin{array}{l} RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{est} - Z_{med})^2} \\ LE90 = 1,6459 RMSE \end{array} \right. \quad (36)$$

sendo que:

n : número de pares estimados e medidos;

Z_{est} : altura estimada;

Z_{med} : altura medida;

$RMSE$: *Root Mean Square Error*;

$LE90$: Erro Linear a 90%

Os erros verticais devem ter ausência de contribuições grosseiras ou sistemáticas asseguradas por suposições de aleatoriedade, independência e normalidade. Portanto, o teste T-Student avaliou se a estatística da amostra ($t_{amostra}$) de $(\overline{\Delta Z})$ tem tendência livre para um comportamento esperado ($t_{n-1,\alpha}$) com erro médio centrado em zero, expressos pela hipótese nula (H_0) contra a hipótese alternativa (H_1) dadas por:

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{\Delta Z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta Z \\ t_{amostra} = \frac{\overline{\Delta Z}}{\sigma_{\Delta Z}} \sqrt{n} \\ H_0: \overline{\Delta Z} = 0 \\ H_1: \overline{\Delta Z} \neq 0 \end{array} \right. \quad (37)$$

sendo que:

$\overline{\Delta Z}$: média das discrepâncias;

$\sigma_{\Delta Z}$: desvio padrão das discrepâncias;

$t_{amostra}$: estatística amostral

H_0 : hipótese nula, a média das discrepâncias é igual a zero;

H_1 : hipótese alternativa, a média das discrepâncias é diferente de zero;

O teste Qui-Quadrado verificou se a estatística amostral ($\chi_{amostra}^2$), referente a dispersão dos erros verticais ($\sigma_{\Delta Z}^2$) possui aderência estatística teórica ($\chi_{n-1,\alpha}^2$) com o conjunto de referência com dispersão tolerada dentro da escala e categoria do PEC-PCD ($\sigma_{PEC-PCD}^2 =$ Erro Padrão). O teste de tolerância é iterativo, se ocorrer $\chi_{amostra}^2 \leq \chi_{n-1,\alpha}^2$, o teste é finalizado para a escala e categoria cartográfica testado. A formulação matemática é dada por:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{\Delta Z} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Z_{est} - Z_{med})^2} \\ \chi_{amostra}^2 = (n-1) \frac{\sigma_{\Delta Z}^2}{\sigma_{PEC-PCD}^2} \\ H_0: \sigma_{PEC-PCD}^2 = \sigma_{\Delta Z}^2 \\ H_1: \sigma_{PEC-PCD}^2 < \sigma_{\Delta Z}^2 \end{array} \right. \quad (38)$$

sendo que:

$\sigma_{\Delta Z}$: desvio padrão das discrepâncias;

$\sigma_{PEC-PCD}^2$: desvio padrão da classe do PEC-PCD;

$\chi_{amostra}$: estatística amostral;

H_0 : hipótese nula, a variância das discrepâncias é igual a classe do PEC-PCD;

H_1 : hipótese alternativa, a variância das discrepâncias é maior que a classe do PEC-PCD;

Os diagramas de Taylor e Alvo foram implementados para fornecer uma visão estatística mais ampla do erro vertical advindo dos MDS interferométricos, e na mesma forma, recorrente nos ambientes costeiros amazônicos. Estes exploraram os parâmetros estatísticos de desvio padrão normalizado (σ^*), correlação linear (ρ), viés normalizado (B^*) e RMSE sem viés normalizado ($uRMSE^*$). Os diagramas Taylor e Alvo abordam a concordância estatística por meio da amplitude da variabilidade e pelo ajuste entre comportamento e forma, ao considerar dados modelados e dados de referência (JOLLIFF et al., 2009).

O diagrama de Taylor envolve uma síntese da precisão do modelo composta pelo grau de correspondência entre as observações estimadas e medidas que são exibidas em coordenadas polares. O σ^* é a distância radial no eixo das abcissas, a ρ é a posição angular, e, o modelo plotado tem a distância da referência proporcional ao RMSE (TAYLOR, 2001). Foi assumido que a melhor performance de erro vertical deve ter pouco viés e alta correlação com dados de referência na posição de (1,1) ao considerar o diagrama de Taylor. Os parâmetros estatísticos utilizados no diagrama de Taylor são mostrados a seguir:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma^* = \frac{\sigma_{est}}{\sigma_{meas}} \\ \rho = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{est} - \bar{z}_{est})(Z_{med} - \bar{z}_{med})}{\sigma_{est} \sigma_{med}} \end{array} \right. \quad (39)$$

sendo que:

σ^* : desvio padrão normalizado;

σ_{est} : desvio padrão dos pontos estimados nos MDS;

σ_{med} : desvio padrão dos pontos medidos com GNSS;

Z_{est} ; \bar{z}_{est} : altura e média dos pontos estimados nos MDS;

Z_{med} ; \bar{z}_{med} : altura e média dos pontos medidos com GNSS;

ρ : correlação linear.

O diagrama de Alvo é capaz de revelar a magnitude dos erros nos modelos propiciando uma visão complementar não obtida apenas com uso da ρ ou RMSE como afirmado por Jolliff et al. (2009). Isto porque o B^* e o $uRMSE^*$ trazem a distância dos conjuntos modelados para a referência por uma perspectiva normalizada da magnitude do erro com caráter de superestimação ou subestimação que são indicados no plano cartesiano. As formulações matemáticas do B^* e do $uRMSE^*$ são descritas como:

$$\begin{cases} B^* = \left(\frac{\bar{z}_{est} - \bar{z}_{med}}{\sigma_{med}} \right) \\ uRMSE^* = \text{sin}(\sigma_{est} - \sigma_{med}) \sqrt{1 + \sigma^{*2} - 2\sigma^*\rho} \end{cases} \quad (40)$$

sendo que:

B^* : viés normalizado;

σ^* : desvio padrão normalizado;

σ_{est} : desvio padrão dos pontos estimados nos MDS;

σ_{med} : desvio padrão dos pontos medidos com GNSS;

Z_{est} ; \bar{z}_{est} : altura e média dos pontos estimados nos MDS;

$uRMSE^*$: RMSE sem viés normalizado.

ρ : correlação linear.

5.3.4 Resultados e Discussões

5.3.4.1 Cadeia Interferométrica

A seleção de imagens CSK e TSX foi definida por meio de critérios como disponibilidade, linha de base espacial e temporal. Foi possível estimar um valor de coerência modelado a priori ($\gamma_{modelada}$), o qual considera a linha de base perpendicular (B_{\perp}), a revisita interferométrica (B_T) e a frequência Doppler centroide (FDC), o qual ficou em torno de [0,35; 0,99] para os pares das cenas CSK e TSX. As seleções de dados CSK e TSX indicaram a priori um grau de coerência moderado a forte para a área de estudo. Em adição, observa-se os parâmetros da estimativa de B_{\perp} e FDC dentro dos intervalos críticos ($*_{cr}$) para a geometria de aquisição interferométrica (Tabela 19).

Tabela 19 - Parâmetros estimados para a linha de base espacial dos pares interferométrica fornecidos com sistemas SAR CSK e TSX.

Interferometria	TSX	CSK	CSK	TSX
	Rasante-Chuvoso	Íngreme-Chuvoso	Rasante-Seco	Íngreme-Seco
Mestre	25/03/2016	07/04/2016	19/10/2016	16/11/2016
Serva	05/04/2016	08/04/2016	23/10/2016	27/11/2016
$\gamma_{modelada}$	0,85	0,99	0,35	0,86
B_T (dias)	11	1	4	11
B_{\perp} (m)	148,14	1515,93	482,46	100,98
$B_{\perp cr}$ (m)	6118,92	4423,05	8956,87	3518,83
h_a (m)	50,91	4,00	29,85	34,84
ΔFDC (Hz)	87,66	111,92	582,95	12,43
FDC_{cr} (Hz)	3577,02	3602,31	3114,62	4147,27

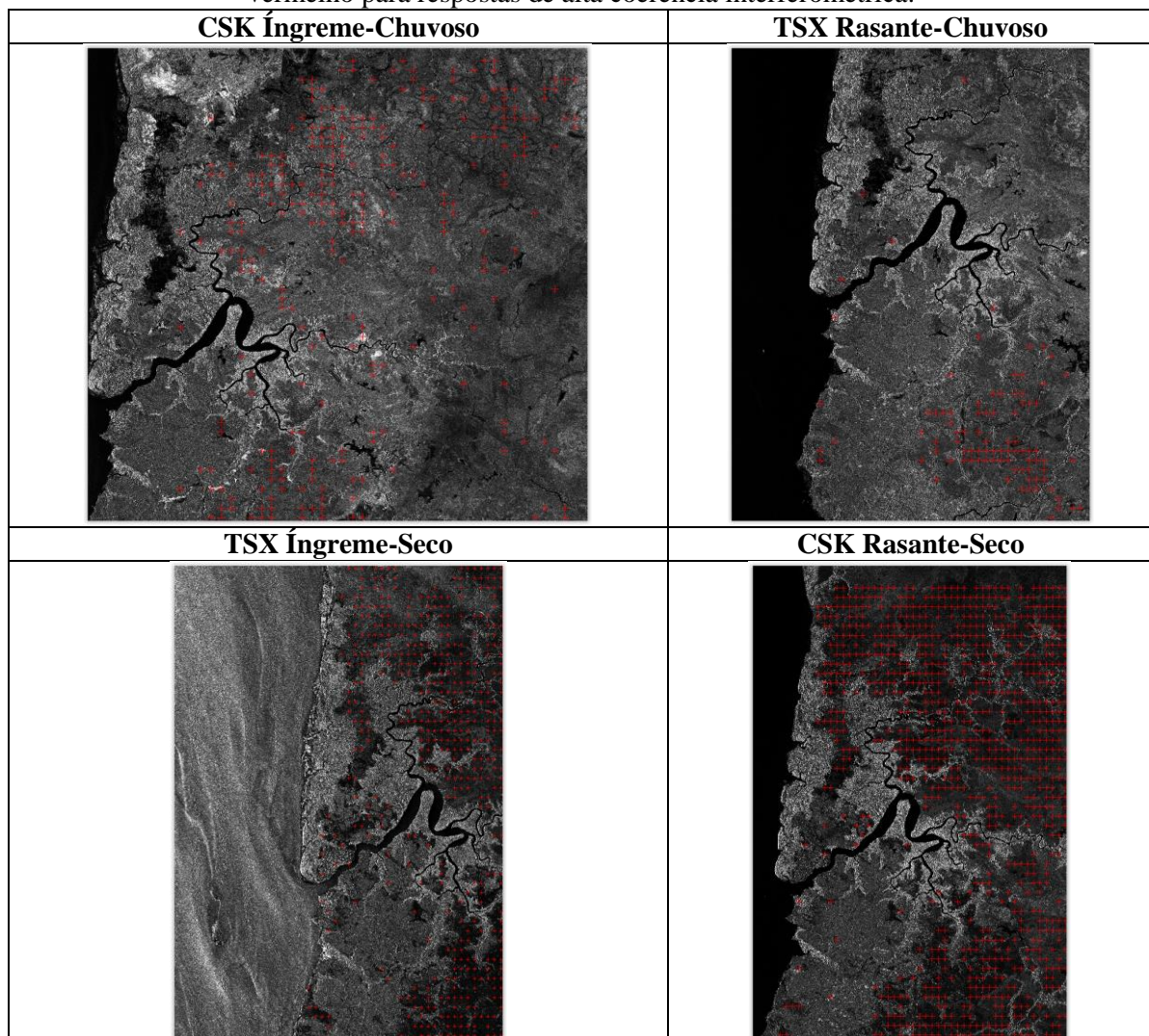
A expectativa teórica para a $B_{\perp cr}$ é função do comprimento de onda, distância alvo-sensor, ângulo de incidência e resolução em alcance, no qual o compromisso está em que linhas de base perpendiculares muito pequenas tem detrimento da resolução vertical altimétrica por causa do ruído e efeitos atmosféricos na fase, e o contrário, podem alcançar tamanhos além da capacidade de reconstrução de interferência com prejuízo de se obter mais ruído do que sinais, de toda forma, comprimentos de onda maiores requerem maiores linhas de base espaciais do que comprimentos de onda menores, dado pela relação $\frac{B_{\perp}}{\lambda}$ contida na equação da altura de ambiguidade (BAMLER; HARTL, 1998; WEGMÜLLER et al., 2009).

A ΔFDC está relacionada às frequências dos sinais enviados em feixes pelas plataformas mestre e serva, o que permite a reconstrução das interferências em suas respectivas compressões efetuadas no processo SAR, em adição, esse parâmetro deve estar dentro do valor crítico que é

a frequência de repetição de pulso (FERRETTI et al., 2007; HANSSEN, 2002). A altura de ambiguidade mostrou uma sensibilidade entre [4,00; 50,91] m, para uma diferença de fase de 2π nos tratamentos interferométricos. Esta altura de ambiguidade aplicada aos ambientes costeiros da foz do rio Amazonas tem restrições para a reconstrução tridimensional, em específico, a relevos de característica plana e amplitude altimétrica inferior a 50 m.

O co-registro das imagens CSK e TSX obteve o nível esperado para tratamentos de interferometria SAR com RMSE menor que 0,05 pixel. Os conjugados TSX Rasante-Chuvoso, CSK Íngreme-Chuvoso, CSK Rasante-Seco e TSX Íngreme-Chuvoso obtiveram no registro automático a coleta de 88, 276, 440 e 839 GCPs, respectivamente. O co-registro conseguiu menor erro, melhor distribuição e maior número de pontos para as soluções nos conjugados de imagens SAR adquiridos na estação seca. Os GCPs do registro ficaram concentrados em áreas com comportamento mais coerente (Figura 39).

Figura 39 - Cenas CSK e TSX conjugadas no processo de co-registro, e , os GCPs coletados em vermelho para respostas de alta coerência interferométrica.



A coerência interferométrica medida para os pares interferométricos foi considerada fraca entre $[0,14; 0,29]$ ao longo de todas as cenas, o que causou inconsistências nas medições de altimetria, cuja a expectativa estava entre 0 a 42 m. O pior caso aconteceu no tratamento TSX rasante-chuvoso com altimetria média de -11,15 m e o melhor caso foi para o tratamento CSK íngreme-chuvoso, com altimetria média de 11,12 m (Tabela 20). Para fins de elaboração de MDS é perceptível a demanda por alta coerência preferencialmente aplicada no período seco com menor influência na constante dielétrica dos alvos.

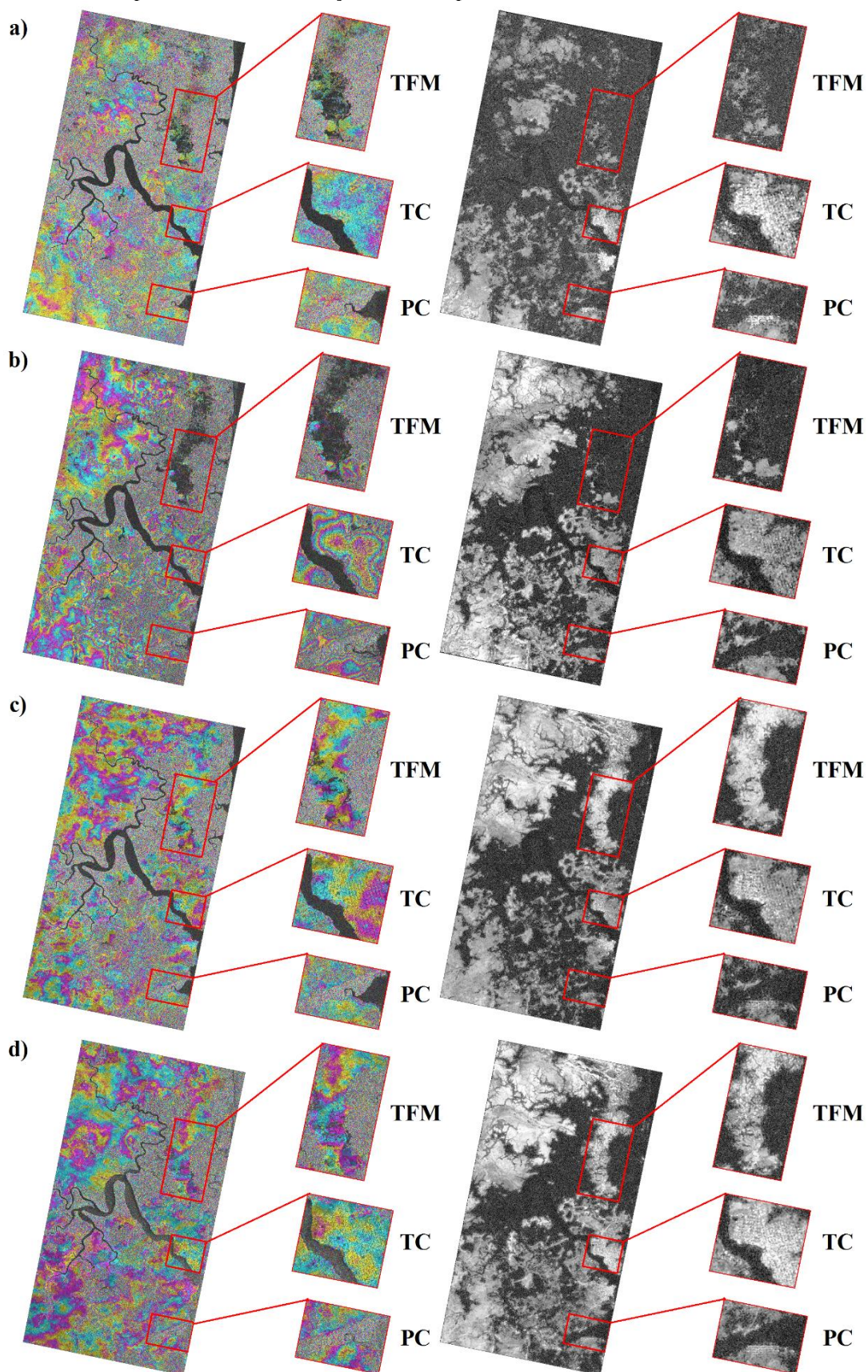
Tabela 20 - Estatísticas descritivas dos produtos interferométricos provenientes dos conjuntos de dados CSK e TSX.

Estatísticas		TSX	CSK	CSK	TSX
		Rasante-Chuvoso	Íngreme Chuvoso	Rasante-Seco	Íngreme-Seco
MDS	Mínimo (m)	-289,95	-3,48	-97,48	-187,23
	Máximo (m)	223,68	27,24	82,82	Máx.:85,37
	Média (m)	-11,15	11,12	-10,30	-4,80
	Desvio Padrão (m)	88,48	4,26	24,65	24,11
Y	Média (m)	0,14	0,26	0,29	0,22
	Desvio Padrão	0,12	0,14	0,19	0,20

Para alta performance em MDS elaborados por interferometria, a CCRS (1999) recomenda valores de coerência em pelo menos 0,7, o qual em aplicações de interferometria de passagem múltipla é mais difícil se obter baixos erros posicionais, e associado a varrições abruptas de relevo com grandes declividades e ambientes de característica incoerente implicam em maior perda de precisão como reportado por Madsen et al (1995) e Toutin (2002). Recentemente, alguns autores reportam resultados satisfatórios para produção de MDS em ambientes incoerentes com emprego de multicanais e múltiplas linhas de base como demonstrado por Ferraioli et al. (2009), Ferraiuolo et al. (2009) e Osmanoglu et al (2014).

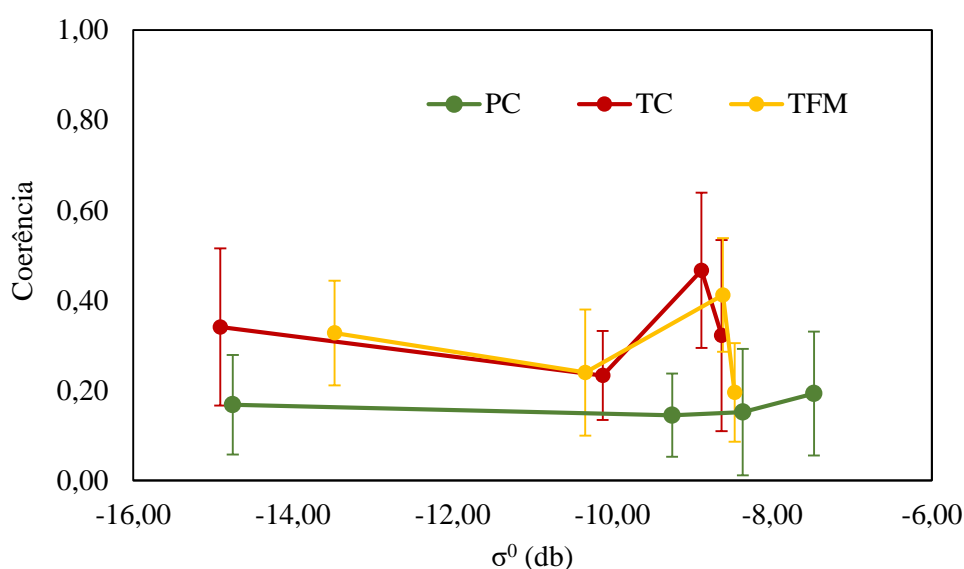
As franjas dos interferogramas em fase plana foram delineadas apenas em superfícies que se comportaram com moderada a forte coerência interferométrica. A espacialização da coerência interferométrica e interferogramas em fase plana estão relacionados com as superfícies de comportamento coerente, porém é perceptível que as maiores porções da área de estudo nos ambientes de PC e TFM tiveram comportamento incoerente (Figura 40).

Figura 40 - Espacialização da área de estudo com os produtos de interferograma em fase plana e coerência interferométrica no qual as letras a), b), c) e d) correspondem aos pares interferométricos TSX rasante-chuvoso, CSK íngreme-chuvoso, CSK rasante-seco e TSX íngreme-seco, respectivamente, em adição, os exemplos das áreas de PC, TC e TFM.



Na Figura 41, observa-se para PC os maiores valores de σ^0 entre [-14,75; -7,48] db, e assim como os menores valores de coerência entre [0,14; 0,19]. Assim, este comportamento permite discriminar a PC dos demais ambientes costeiros, por outro lado, a coerência entre TC e TFM foram próximas, correspondendo a [0,23; 0,47] e [0,20; 0,41], respectivamente. Isto sugere ambiguidade no mapeamento TC e TFM, logo a diferenciação deve utilizar σ^0 , textura, contexto e forma para a informação de polarização única na banda X.

Figura 41 - Caracterização da coerência interferométrica por ambientes costeiros para com as observações dos pontos de campo. É notório que a informação de coerência interferométrica pode contribuir na discriminação dos ambientes costeiros.



As características de coerência na área de estudo estão relacionadas aos tipos de cobertura da terra e a dinâmica de inundação dos ambientes costeiros. Ambientes costeiros de supramaré acima da cota de inundação hidrológica e apresentando pouco cobertura florestal obtiveram maior coerência e mais franjas interferométricas bem definidas, o que indica maior chance de obter produtos interferométricos com precisão. O ambiente costeiro amazônico mais adequado para aplicações interferométricas é o tabuleiro costeiro.

5.3.4.2 Acurácia Vertical dos MDSs Interferométricos

Os pares interferométricos CSK e TSX permitiram elaborar MDS com abordagens para o ângulo de incidência íngreme ($\theta < 35^\circ$) e rasante ($\theta \geq 35^\circ$) durante os períodos chuvoso e seco. Para a executar a cadeia de processamento interferométrico, utilizou-se 12 PCTs para a remoção da fase plana do interferograma e refinamento orbital. A avaliação de acurácia vertical

empregou 40 PCIs nos 4 tratamentos para obter as estatísticas de discrepâncias, RMSE e LE90 (Tabela 21)

Tabela 21 - Estatísticas de acurácia vertical para os MDSs interferométricos baseada na discrepância dos erros, RMSE e LE90.

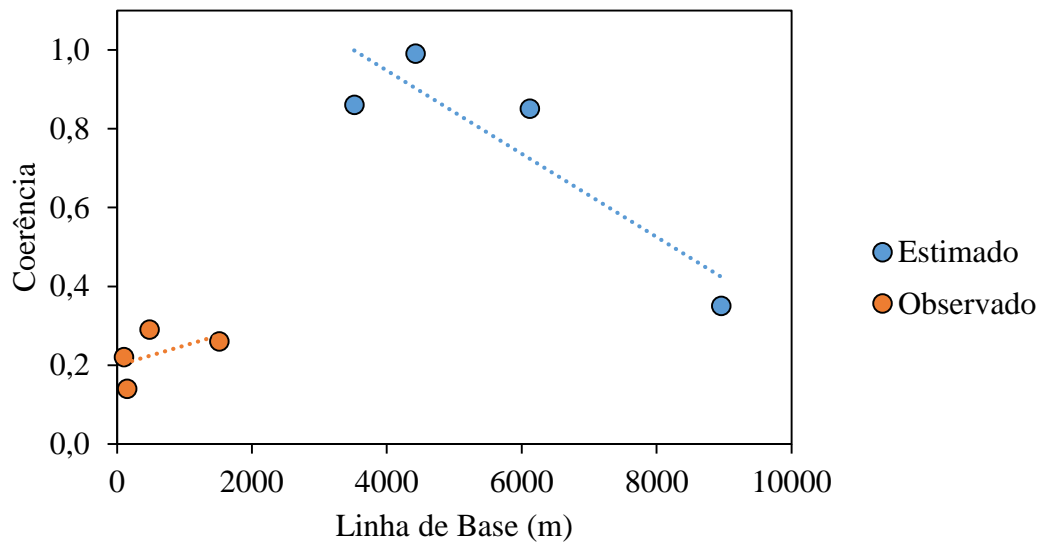
SAR	Modelos	ΔZ_{min} (m)	ΔZ_{max} (m)	$\overline{\Delta Z}$ (m)	$\sigma_{\Delta Z}$ (m)	RMSE (m)	LE90 (m)
CSK	Íngreme-Chuvoso	0,14	17,04	8,94	3,47	9,57	15,75
	Rasante-Seco	-13,99	28,79	6,28	11,49	12,97	21,33
TSX	Rasante-Chuvoso	-32,54	86,68	14,32	20,98	25,18	41,42
	Íngreme-Seco	-43,84	42,25	-2,33	17,03	16,97	27,92

As estatísticas de discrepâncias média ($\overline{\Delta Z}$) mostraram superestimativas para os modelos CSK Íngreme-Chuvoso, CSK Rasante-Seco e TSX Rasante-Chuvoso. A exceção ocorreu com o modelo TSX Íngreme-Seco com característica de subestimação. Os valores mínimo e máximo de discrepâncias revelam erros grosseiros entre [-43,84; 86,68] m, estes relacionados a fraca performance da coerência, observados nos pares interferométricos do TSX com linhas de base espacial em [100,98; 148,14] m e temporal de 11 dias. Os ambientes costeiros amazônicos de relevo fortemente plano e baixa amplitude altimétrica demandam por valores baixos de altura de ambiguidade garantido pelo MDS CSK Íngreme-Chuvoso na ordem de 4,00 m.

Aplicações de dados SAR em reconstrução tridimensional demandam linhas de base espaciais precisas na ordem da metade ou até a terça parte da linha de base crítica em teoria (FERRETTI et al., 2007; FERRETTI; PRATI; ROCCA, 1999; TOUTIN, 2002; TOUTIN; GRAY, 2000).

O comportamento da coerência e linha de base espacial estimados são distintos dos valores observados nos pares interferométricos processados na cadeia interferométrica, logo as condições ambientais têm significativo impacto na precisão dos MDS (Figura 42).

Figura 42 - Características da coerência estimada e observada para os pares interferométricos utilizados para mapear os ambientes costeiros amazônicos.



A coerência pode ser decomposta em componentes de descorrelação temporal, espacial e termal, de modo que técnicas interferométricas de passagens múltiplas são majoritariamente influenciadas pela descorrelação temporal (ZEBKER; VILLASENOR, 1992). Para tanto, duas grandes iniciativas estão sendo empregadas para melhorar a performance da coerência na interferometria de passagens múltiplas, em ambientes incoerentes como uso de espalhadores persistentes (FERRETTI et al., 2001; HOOPER et al., 2004; KAMPES, 2006) e linhas de base curtas (BERARDINO et al., 2002; SCHMIDT; BU, 2003). A vantagem de se utilizar interferometria de passagem múltipla está na possibilidade de definir uma aquisição mínima ($N \geq 2$) no período adequado ao estudo. Paradella et al. (2015) notaram o impacto de fortes chuvas para a estimativa da coerência interferométrica, o qual a precipitação no período chuvoso chegou até 600 mm e o patamar de coerência caiu para até 0,3 em revisitas de 11 a 22 dias com TSX, mesmo utilizando técnica interferométrica SAR multitemporal de 33 cenas, para espalhadores persistentes e distribuídos. Isto demonstra o desafio em se aplicar as técnicas interferométricas contemporâneas em ambiente amazônico.

Os MDS interferométricos alcançaram RMSE entre [9,57; 25,18] m, e consequentemente, LE90 entre [15,75; 41,42] m, o qual o maior erro vertical foi notado para o MDS TSX Rasante-Chuvoso, ao contrário, o menor erro vertical ocorreu no MDS CSK Íngreme-Chuvoso. Estes parâmetros de acurácia revelaram maior precisão nos modelos provenientes do CSK que executaram revisitas interferométricas de 1 a 4 dias, contra os modelos do TSX com revisitas interferométricas de 11 dias. Isto ratifica a condição de coerência como

primeiro parâmetro na elaboração de MDS. Ao se observar os conjuntos TSX em mesma condição de linha de base temporal, é notório a vantagem de acurácia vertical obtida durante o período seco, mesmo em condições distintas de ângulo de incidência. Para fins de atualização de mapeamento topográfico, os erros verticais devem ser minorados pelo menos ao patamar da acurácia vertical de MDEs com fonte aberta, os quais tem RMSE na ordem de [3,2; 18,8] m aplicados em diferentes tipos de ambientes como constatado por Mukherjee et al., (2013) e SZABÓ et al, (2015). Aplicações em alta performance de acurácia vertical devem ser equivalentes a superiores obtidas por técnica radargramétrica, como reportado nos estudos de Oliveira et al (2011) com RMSE entre [6,3; 6,7] m para dados Stripmap em ambiente florestal e Capaldo et al. (2015) com RMSE entre [3,0; 3,9] m para dados Spotlight em ambiente de floresta temperada e urbanizado.

Os MDS foram submetidos aos testes estatísticos do PEC-PCD com nível de confiança de 90%, que inclui o requisito de normalidade, a ausência de viés e a aderência estatística ao conjunto da classe de mapa com a tolerância do erro máxima permitida. Os testes estatísticos do PEC-PCD permitiram categorizar os MDS interferométricos de acordo com a acurácia vertical (Tabela 22).

Tabela 22 - Testes estatísticos para se obter a escala cartográfica segundos os requisitos do PEC-PCD para com os MDSs interferométricos.

MDS	Shapiro-Wilk		T-Student		Qui-Quadrado		Escala	Classe
	IC	p-valor	IC	p-valor	IC	p-valor		
CSK Íngreme Chuvoso	2,8-11,9	0,01	8,0-9,9	0,00	8,6-18,3	0,65	1:25000	B
CSK Rasante Seco	-11,7-24,6	0,41	3,2-9,3	0,00	94,4-200,5	0,17	1:50000	D
TSX Rasante Chuvoso	-15,6-42,3	0,07	8,7-19,9	0,00	314,4-667,8	0,62	1:100000	C
TSX Íngreme Seco	-22,1-26,6	0,51	-6,8-2,3	0,41	207,1-439,9	0,79	1:100000	B

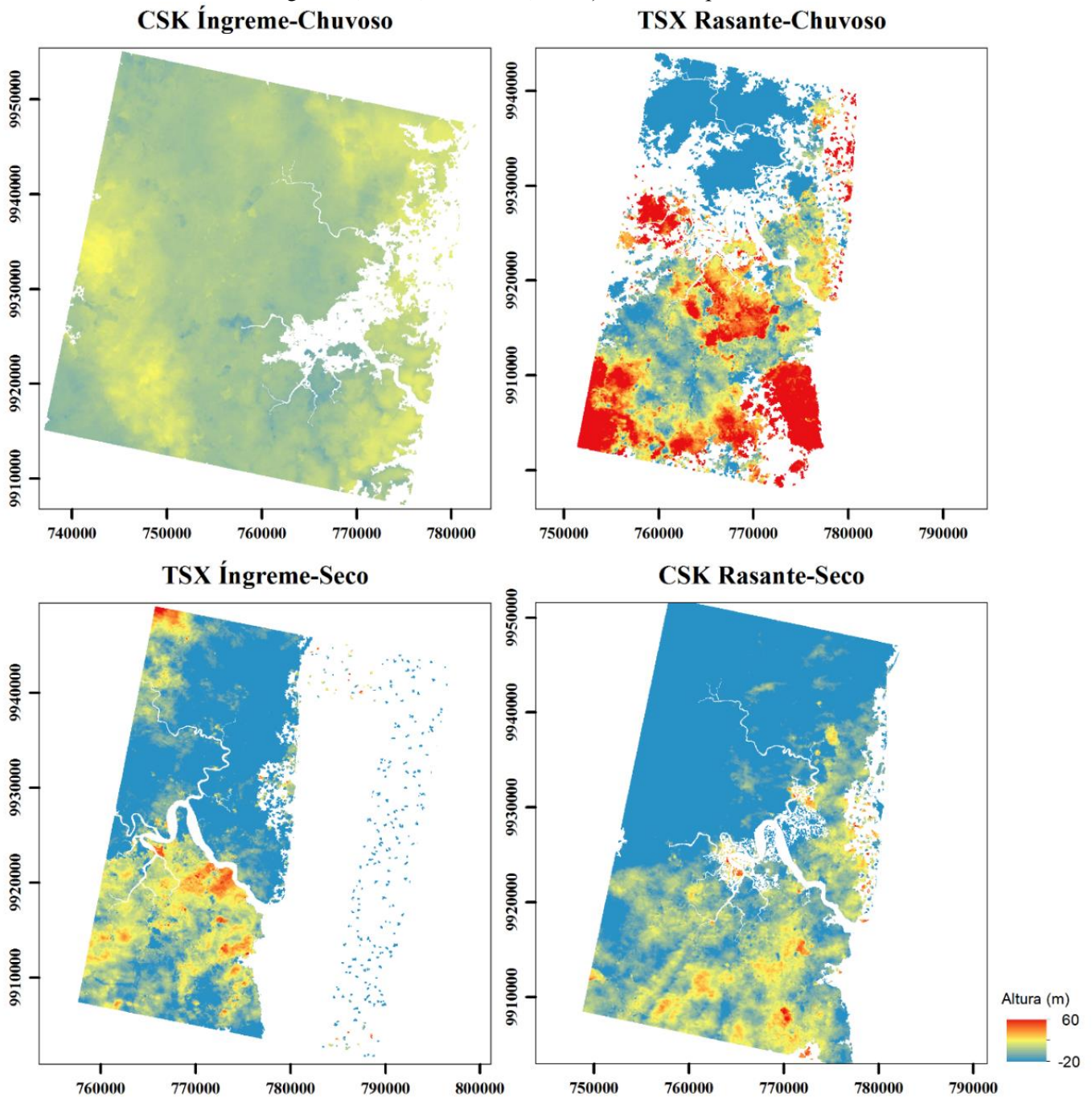
Para fins formais de validação cartográfica, o mapa deve apresentar resíduos com comportamento normal e livres de viés, estes garantidos pelos testes Shapiro-Wilk e T-Student. A normalidade foi confirmada em todos os MDS, exceto pelo MDS CSK Íngreme-Chuvoso com p-valor de 0,01, e a presença de viés foi confirmada em todos os MDS, exceto pelo MDS TSX Íngreme-Seco com p-valor de 0,41. Estes resultados indicam que a estimativa dos erros

sofreu interferência alheia a aleatoriedade inerente das medições *in situ*, provavelmente relacionada a contribuições de pixel adjacentes em áreas vegetadas com dosséis emergentes de 25 a 35 metros comuns nos manguezais da planície costeira e nas florestas densas de terra firme. Para resolver estas questões é importante: i) utilizar pares interferométricos com revisita melhor que 5 dias, altura de ambiguidade menor que 5 m, linhas de base entre 100 e 2000 m, preferencialmente adquiridos em ângulos rasantes; ii) optar por múltiplas aquisições temporais ($15 \leq N \leq 30$) para aplicar técnicas interferométricas que se utilizam de espalhadores persistentes e distribuídos em ambientes de comportamento incoerentes, como sugerido nos estudos de Antonova et al. (2016), Ferretti et al. (2011), Paradella et al. (2012), Ruiz-Armenteros et al. (2016) e Zhang et al. (2016); iii) a amostragem de campo deve contemplar toda a amplitude planimétrica e altimétrica da cena, além de prover medições do terreno sem interferências de objetos não topográficos e/ou dossel florestal, em acordo com a resolução espacial final do produto cartográfico. Em adição, é exposto que as condições de revisita interferométrica em 11 dias, precipitações da ordem de [49,00; 101,6] mm e incidências íngremes, sugeriram as condições mais adversas para elaboração de MDS nos ambientes costeiros amazônicos.

De fato, o principal produto de MDS em nível global é o modelo WorldDEM, elaborado pela missão TerraSAR-X, em arranjo tandem (TanDEM-X), baseado em interferometria de passagem única biestática o qual cobriu 80 % do globo com uma grade regular de 12 m e acurácia vertical absoluta de 10 m. Os esforços de mapeamento topográfico em ambientes costeiros amazônicos devem alcançar os patamares de acurácia vertical obtidos pelos atuais sistemas SAR, além de se apresentarem em continuidade sistemática para toda a diversidade e dinamicidade da paisagem.

A Figura 43 mostra os MDSs interferométricos com formas de relevo contínuas e bem definidas, em áreas com maior coerência concentradas próximas as áreas de coleta de pontos de controle no terreno, opostamente, as formas de relevo em áreas de baixa coerência recorrentes em terrenos alagados e ambientes de densa cobertura florestal, foram muito prejudicadas contribuindo para a formação de artefatos não topográficos, ou seja, formas elaboradas em franjas interferométricas ruidosas e altimetrias inconsistentes com valores abaixo da cota zero ou acima da cota de 60 m (erros grosseiros ou outliers).

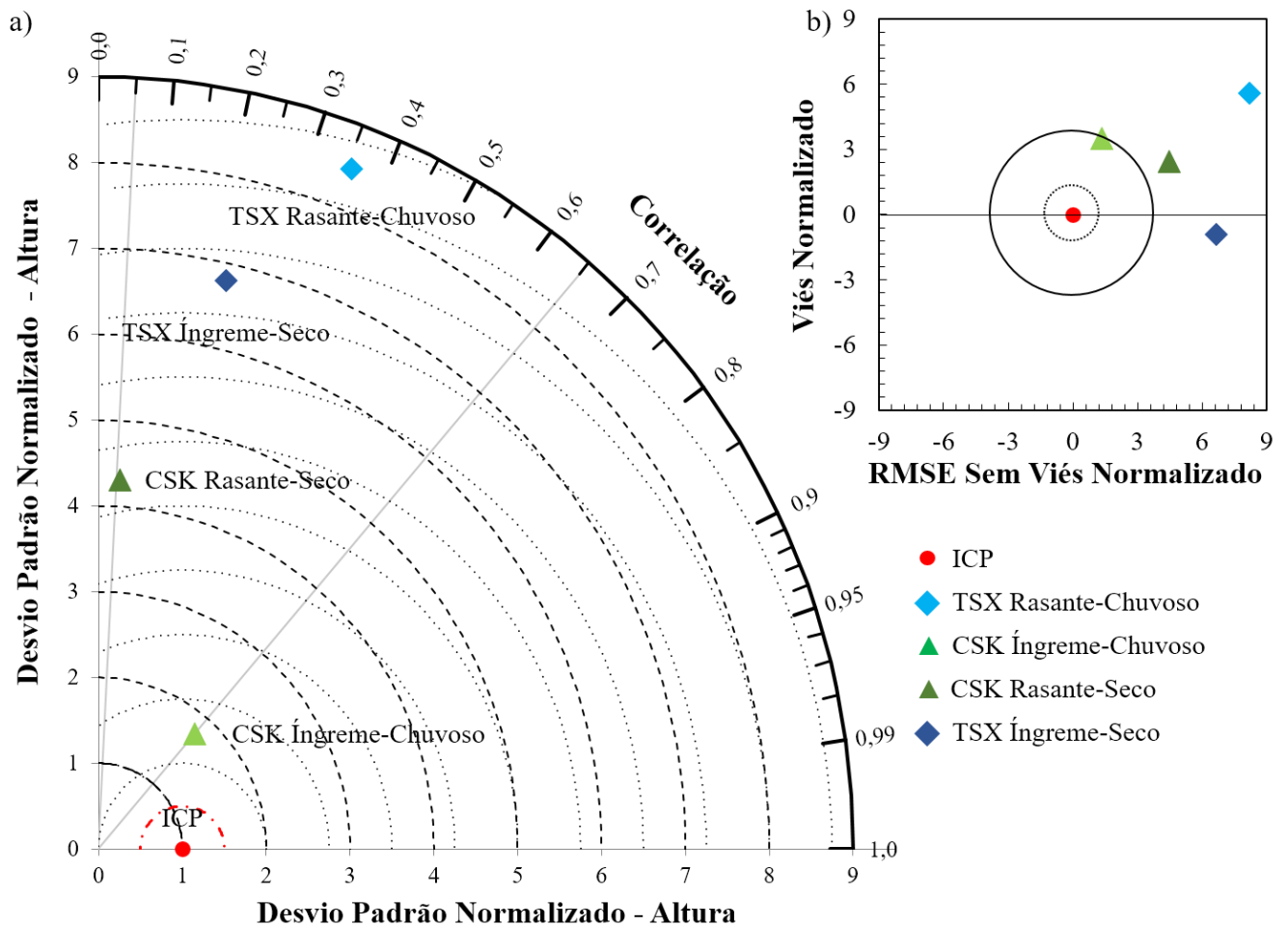
Figura 43 - MDSs interferométricos elaborados a partir de dados SAR CSK e TSX adquiridos em incidências íngreme ($\theta < 35^\circ$) e rasante ($\theta \geq 35^\circ$), durante o período chuvoso e seco.



Os diagramas de Taylor e Alvo abordaram uma perspectiva complementar para a avaliação de acurácia vertical dos MDSs interferométricos baseados em ρ , σ^* , B^* e $uRMSE^*$. O diagrama de Taylor na Figura 44(a) apresenta, entre todos os modelos interferométricos, o MDS CSK Íngreme-Chuvoso em posição mais próxima aos pontos de referência, notado a mais forte ρ de 0,65 e o menor σ^* de 1,77. Em contrapartida, o MDS TSX Rasante-Chuvoso alcançou a posição mais afastada da referência com segunda mais fraca ρ de 0,36 e o maior σ^* de 8,49.

O diagrama de Alvo Figura 44(b) mostra os MDSs interferométricos fora da dispersão inicial normalizada de 1 por 1, nos eixos x e y para a referência, estes se caracterizaram por superestimava ao se notar os valores de B^* entre [2,45; 5,59], exceto com o MDS TSX Íngreme-Seco com características de subestimação, alcançando o menor B^* de -0.91. Todos os MDSs interferométricos apresentaram a dispersão estimada maior que a dispersão observada com $uRMSE^*$ entre [1,36; 8,18], em posição a direita da referência no eixo das abcissas.

Figura 44 - Diagramas de Taylor e Alvo gerados para alocar os MDSs interferométricos segundo os erros verticais em relação as observações de referência GNSS levantadas em campo.

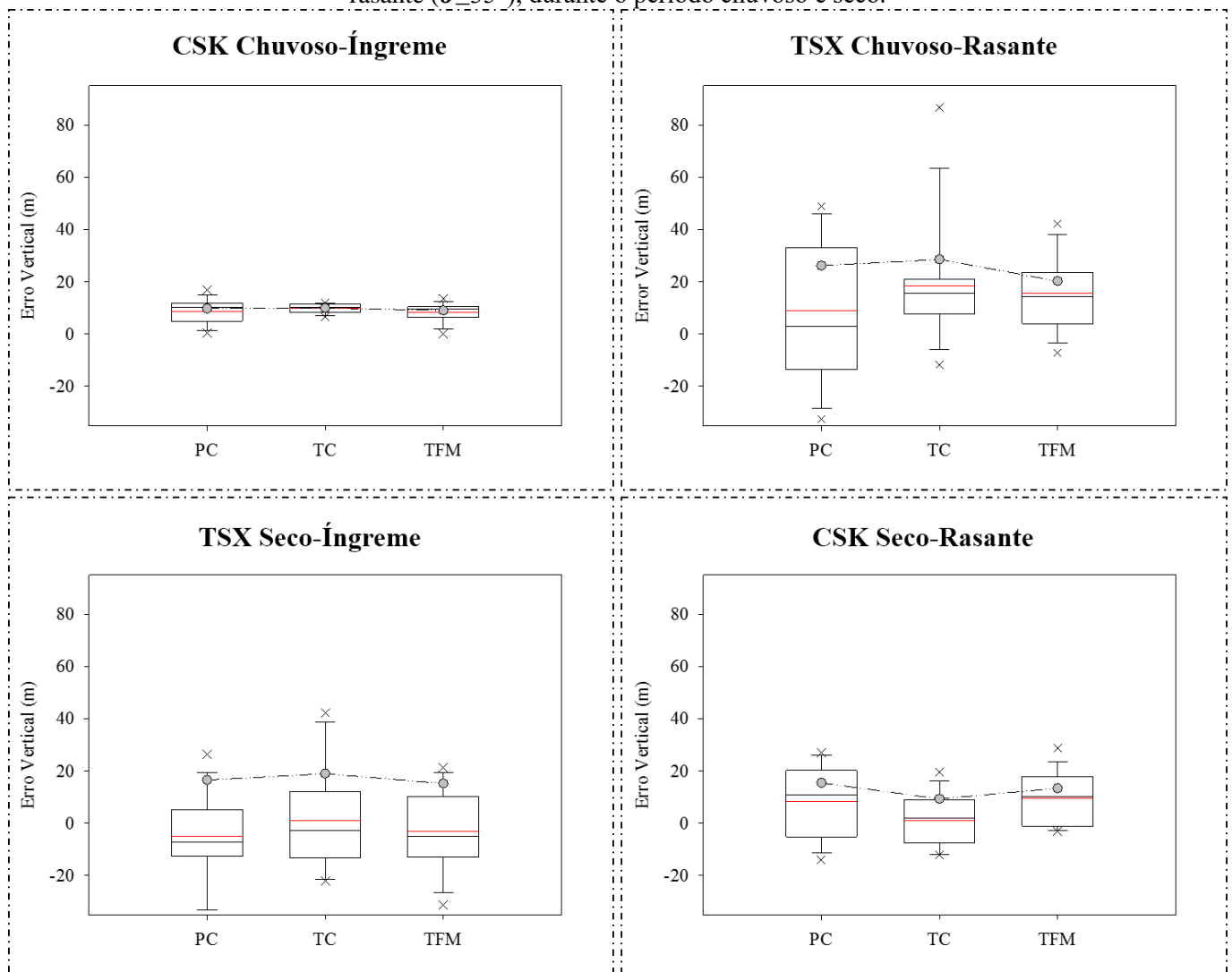


A dispersão entre as alturas estimadas comparada com a dispersão das alturas observadas tem maior impacto na performance dos MDSs interferométricos do que a associação linear. Portanto os modelos de reconstrução 3D devem priorizar predições consistente na variabilidade, neste caso atrelado a ausência de forte coerência dos pares interferométricos e evitar períodos de chuva.

5.3.4.3 Acurácia Vertical dos Ambientes Costeiros

A acurácia vertical para os ambientes costeiros amazônicos foi executada a partir dos 40 PCIs categorizados como 13 para PC, 13 para TC e 14 para o TFM, além dos 12 PCTs utilizados para elaborar os MDS interferométricos. A caracterização dos erros verticais mostrou a dispersão das discrepâncias e o RMSE por ambiente costeiro na Figura 45.

Figura 45 - Características do erro vertical em discrepância (box plot) e RMSE (linha tracejada) por ambiente costeiro a partir dos MDSs interferométricos elaborados sob incidência íngreme ($\theta < 35^\circ$) e rasante ($\theta \geq 35^\circ$), durante o período chuvoso e seco.

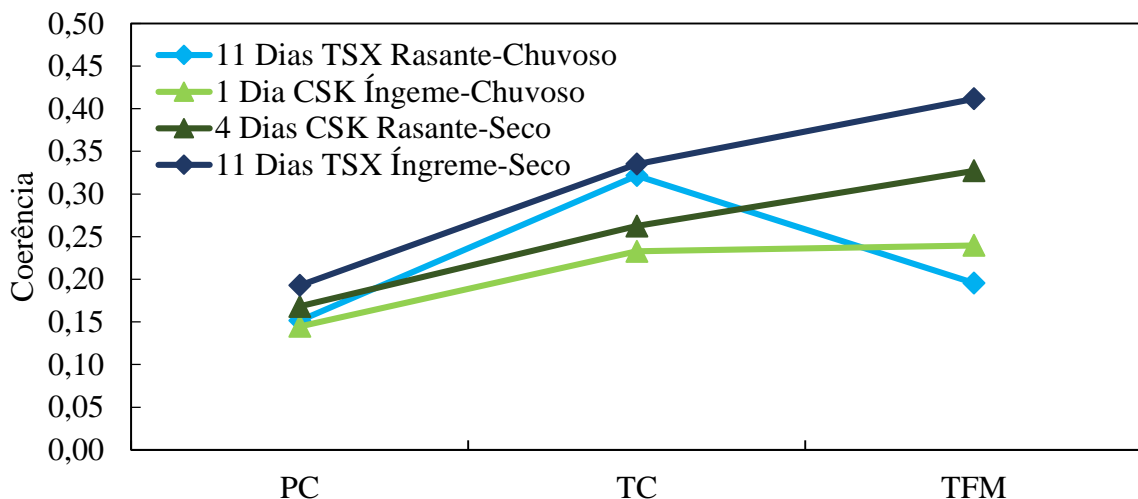


Os erros verticais foram descritos para a PC com $\overline{\Delta Z}$ de [4,59; 25,68] m e [9,74; 26,24] m de RMSE, para o TC com $\overline{\Delta Z}$ de [1,78; 22,85] m e [9,30; 28,59] m de RMSE, e TFM com $\overline{\Delta Z}$ de [3,57; 15,50] m e [9,06; 20,33] m de RMSE. Foi perceptível que o TFM alcançou os menores erros verticais, provavelmente associado a composição do ambiente costeiro com

cobertura vegetal de menor porte, composta por espécies arbustivas e campestres, além de áreas de solo exposto. Os maiores erros verticais apresentados na PC e TC, em porções coerentes dos MDS, podem ser relacionados ao efeito dossel, recorrente nos pixels originais adjacentes, combinados nas reamostragens dos processos de *multilook* e geocodificação, com grade final de 12 m. No caso dos ambientes costeiros amazônicos, a variação de declividade não é um fator significativo para contribuir como fonte de erro. De fato, a inexistência de procedimentos para modelar objetos não topográficos e efeito do dossel florestal compromete a acurácia vertical absoluta de MDSs. Para tanto é necessário utilizar técnicas SAR avançadas aliadas a modelos de dossel florestal e mapas de cobertura da terra, para apoiar desde a amostragem em campo até as medições estatísticas de validação do produto cartográfico, como reportado por Ho Tong Minh et al. (2016), O’Loughlin et al. (2016) e Perko et al. (2011).

A questão preponderante nos erros verticais dos ambientes costeiros está na ausência de coerência forte ($> 0,60$) o que leva grande prejuízos na estimativa da altura pela presença de ruídos no interferograma, e por sua vez é influenciada pelo tipo de cobertura da terra presentes nas diferentes unidades geomorfológicas costeiras. Os limiares de coerência para os ambientes costeiros amazônicos ficaram entre $[0,14; 0,41]$. A menor coerência ocorreu para a PC com $[0,14; 0,19]$ e a maior foi para TFM com $[0,20; 0,41]$. O comportamento da coerência está atrelado a composição da linha de base temporal, estação do ano e tipo de ambiente costeiro no qual se nota a biomassa vegetal e a inundação periódica como elementos limitantes. Exemplo disto está na Figura 46, que mostra as aquisições em período seco melhorando os valores de coerência em todos os ambientes costeiros, e a inundação diminuindo a coerência especificamente no TFM.

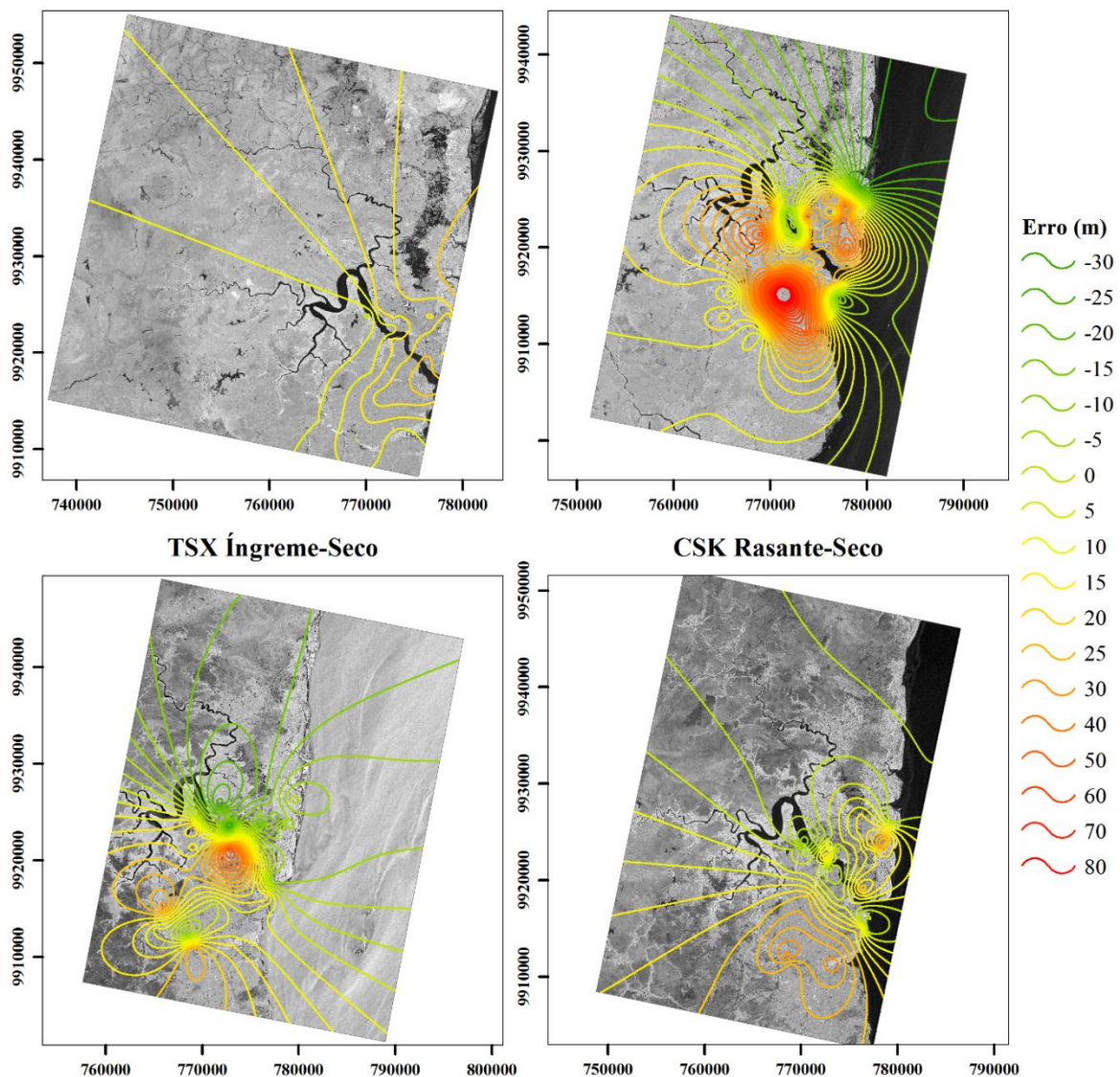
Figura 46 - Caracterização dos ambientes costeiros amazônicos para o comportamento da coerência em diferentes composições de tempo de revisita interferométrica durante as estações chuvosa e seca.



Os ambientes costeiros apresentaram comportamentos distintos para a coerência interferométrica. A PC teve em todas as possibilidades de aquisição SAR baixa coerência ($<0,20$) associada a elevada altura de dossel, o TC demonstra ser o ambiente mais estável para a coerência, e o TFM por estar suscetível a inundação sazonal teve a maior dificuldade para ter compromisso com a coerência no período chuvoso. Apesar dos erros verticais serem menores no caso CSK Íngreme-Chuvoso, preferencialmente, deve-se utilizar aquisições interferométricas em arranjo tandem com passagens múltiplas de revista melhor que 1 dia em incidência rasante ($\theta > 35^\circ$), haja vista que a precisão cartográfica tem forte relação com a decorrelação temporal.

A espacialização dos erros verticais em isolinhas permitiu ratificar a adequabilidade da técnica de interferometria SAR para com em ambientes costeiros amazônicos (Figura 47).

Figura 47 - Mapa de isolinhas com erros verticais dos MDSs interferométricos.
CSK Íngreme-Chuvoso TSX Rasante-Chuvoso



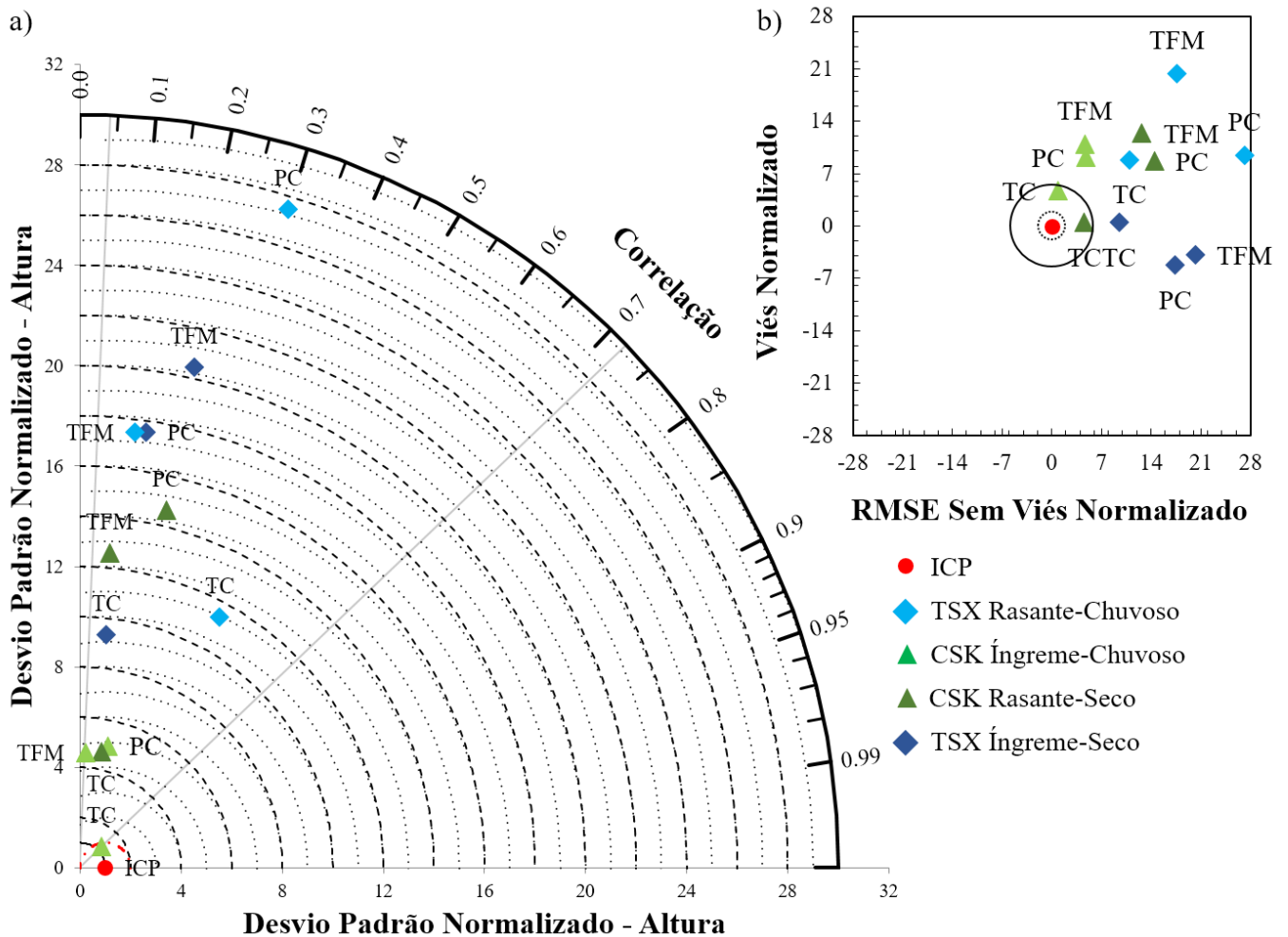
O mapa de isolinhas apontou o MDS TSX Rasante-Chuvoso com maior amplitude de erros verticais entre [-30; 80] m, e neste caso, existe uma forte depreciação da estimativa de altura ocorrendo no TC, na porção central do mapa, mais especificamente ao sul do rio Paracauari, isto ocorreu em função das fortes chuvas (cerca de 100 mm em 5 dias), observadas durante esta aquisição interferométrica de 11 dias. O MDS CSK Íngreme-Chuvoso indicou poucas curvas em uma amplitude menor de erros verticais entre [5; 25] m, o que demonstrar o melhor desempenho relativos aos demais tratamentos, contudo a ocorrência dos erros verticais foi observada na porção leste na presença extensa da PC, ao longo da linha de costa. Os MDSs elaborados no período seco, tiveram erros de diferentes distribuições, entretanto foi perceptível as porções de TFM com menor erro vertical situadas nas porções centro norte das cenas.

Capaldo et al. (2015) demonstraram a alta performance de MDS, elaborados por radargrametria para dados CSK Spotlight em ambientes temperados, o qual alcançou erros verticais melhores que 5 m. Isto indica a melhor adequabilidade da radargrametria para obter MDS, em detrimento da aplicação de interferometria SAR em único par multitemporal.

Os diagramas de Taylor e Alvo possibilitaram ordenar os ambientes costeiros de acordo com os parâmetros estatísticos de ρ , σ^* , B^* e $uRMSE^*$ (Figura 48). A PC produziu os maiores valores de σ^* entre [4,98; 27,48] e fraca ρ entre [0,15; 0,30], e consequentemente atingiu a posição mais afastada da referência, sendo o ambiente costeiro de maior dificuldade para o mapeamento por apresentar terrenos sujeitos a inundação periódica e dossel florestal elevado. Em contrapartida, o TC alcançou a posição mais próxima da referência, com a mais forte ρ entre [0,11; 0,71] e o menor σ^* entre [1,18; 11,42], sendo o ambiente costeiro de maior adequabilidade a aplicação de interferometria SAR, por ter feições homogêneas formadas por solo exposto, áreas desflorestadas e infraestrutura humana. O TFM alcançou uma posição intermediária, associada ao desempenho do modelo a estação chuvosa e seca (Figura 48a).

O diagrama de Alvo Figura 48(b) indicou o TFM superestimando e subestimando as alturas nos MDSs interferométricos com o B^* entre [-3,85; 20,37], de mesma forma se comportou a PC com B^* entre [-5,26; 9,47], de modo que a superestimava foi mais comum e a subestimativa somente ocorreu em período seco. O TC se mostrou o ambiente de menor viés na estimativa da altura. Todos os ambientes costeiros apresentaram a dispersão estimada maior que a dispersão observada com $uRMSE^*$ entre [0,86; 27,20], estes em posição a direita da referência no eixo das abcissas.

Figura 48 - Diagramas de Taylor e Alvo para os ambientes costeiros amazônicos alocando posições segundo os parâmetros de erro verticais dos MDSs interferométricos para com a referência de observações GNSS em campo.



A questão preponderante para aplicação de interferometria SAR nos ambientes costeiros amazônicos reside na aquisição interferométrica adequada às condições severas de clima e dinâmica. Isso se mostra praticável para cenas SAR de geometria rasante durante a estação seca. As iniciativas correntes demonstram que as aplicações de interferometria SAR multitemporais ($N > 30$), baseadas em espalhadores persistentes e distribuídos, apesar de voltadas a situações específicas com vantagens e desvantagens, podem suportar mapeamentos de alta precisão (submétrico e centimétrico) em ambientes de comportamento incoerentes (OSMANOĞLU et al., 2016; PARADELLA et al., 2012).

5.3.5 Conclusões

Os dados CSK e TSX têm potencial para aplicações interferométricas de mapeamento topográfico, monitoramento de deformações e detecções de mudanças nos ambientes costeiros da foz do Amazonas, mesmo em superfície de baixa variação altimétrica e sujeitas a mudanças constantes decorrentes sobretudo da maré.

A seleção e aquisição de imagens CSK e TSX para elaboração de MDS deve: i) priorizar aquisições em arranjo Tandem com defasagem temporal de 1 dia; ii) considerar linhas de base perpendiculares pequenas ao considerar a altura de ambiguidade suficiente para o relevo mapeado; iii) obter linhas de base consistentes que estão entre metade a terça parte da linha de base crítica, em adição, recomenda-se mais de um interferograma contemplando pequenas e grandes linhas de base; iv) evitar aquisições em épocas chuvosas ou ventos fortes, e ainda, priorizar aquisições noturnas em dias de temperatura mais amena para reduzir efeitos atmosféricos; e, vi) considerar a paisagem mapeada e identificar alvos/superfícies de espalhamento volumétrico.

A coerência interferométrica foi a priori moderada a forte para os ambientes costeiros amazônicos, porém isto não foi suficiente para manter os produtos interferométricos isentos de ruído, mesmo com a melhor diferença temporal de aquisição em 1 dia. Neste estudo, a aplicação interferométrica dos dados CSK e TSX forneceu indícios de que MDSs derivados obtiveram precisão inferior a capacidade do sistema sensor. De mesma forma, a investigação deve prosseguir esgotando as possibilidades de tratamento com o uso de múltiplas linhas de base e múltiplas frequências.

Os MDSs interferométricos alcançaram RMSE entre 9,57 a 25,18 m. O MDS CSK Íngreme-Chuvoso com revisita de 1 dia obteve tolerância do erro vertical compatível a escala cartográfica de 1:50.000 classe A. Porém, este MDS interferométrico demonstrou incompatibilidade como descontinuidade tridimensional e estimativas inconsistentes nos ambientes de comportamento incoerentes.

Os erros verticais dos MDSs foram muito superiores se comparados ao MDS do SRTM o que mostra ser um entrave para a elaboração de MDS em ambientes costeiros. É observado que a configuração dual de radar em passagem multitemporal única não proporcionou uma condição adequada de mapeamento altimétrico em função da pouca sensibilidade altimétrica proporcionada na altura de ambiguidade se consideramos o relevo costeiro majoritariamente plano de cotas inferiores a 60 m.

O ambiente costeiro mais adequado para o desenvolvimento de técnicas interferométricas é o Tabuleiro Costeiro, e controversamente, estão as porções de densa cobertura florestal sujeitas a inundações periódicas como a Planície Costeira e o Terraço Fluviomarinho.

As próximas iniciativas na ZCA para a técnica interferométrica devem utilizar aquisições SAR multitemporais ($N \geq 15$), multicanais polarimétricos, espalhadores persistentes e distribuídos e/ou *speckle tracking*.

5.4 Elaboração de MDS por Radargrametria

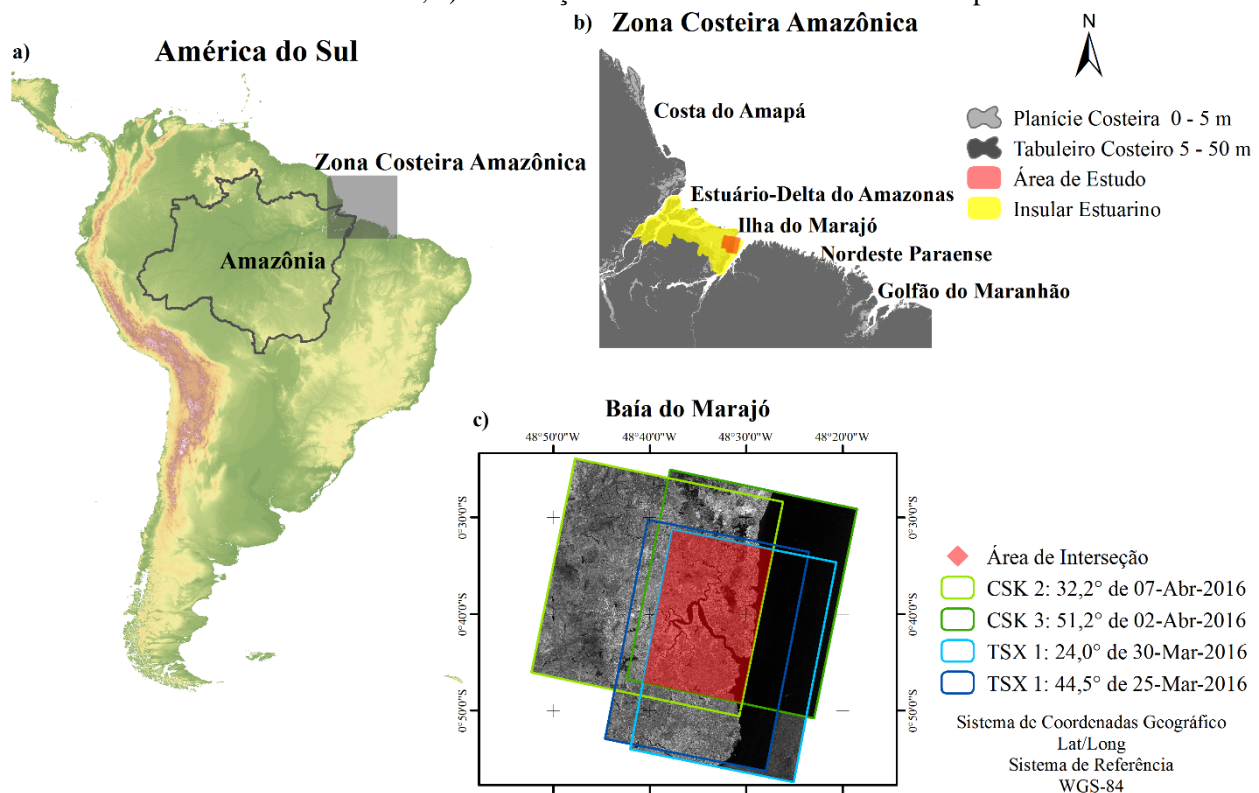
5.4.1 Objetivos

Este experimento contribuiu nos estudos da ZCA em aplicar radargrametria para elaboração de MDSs no relevo plano e dinâmico, e da mesma forma, avaliar a acurácia vertical dos MDSs, ao considerar os modelos radargramétricos do SARscape e Toutin para os dados Stripmap CSK e TSX, durante a estação chuvosa. Além do mais, foi observada a relação entre o tipo de ambientes costeiro e a acurácia vertical.

5.4.2 Área de Estudo

A dinâmica de variações de linha de costa foi considerada na especificação da área do experimento IV, que face à característica de mapeamento temporal, foi delimitada pela interseção das faixas de imageamento SAR, definidas pelas órbitas descendentes dos satélites CSK e TSX. Estas quatro cenas SAR cobrem a borda leste da Ilha de Marajó, na margem esquerda da Baía de Marajó e dentro do setor Insular Estuarino da ZCA (Figura 49).

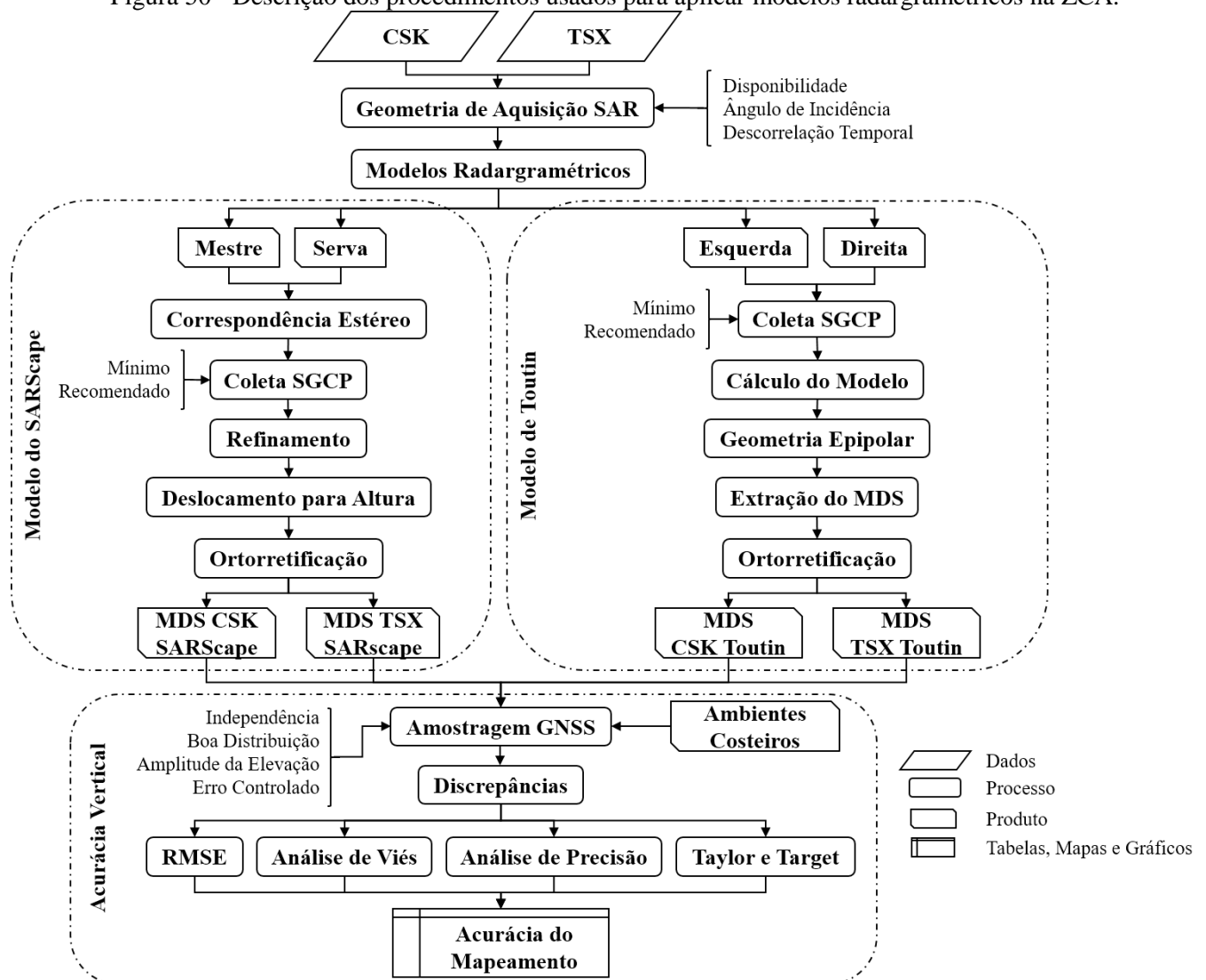
Figura 49 - a) Localização da zona costeira amazônica; b) compartimentos da costa amazônica com unidades de relevo; c) localização das cenas SAR utilizadas no experimento III.



5.4.3 Método

Os procedimentos para esta etapa consistiram basicamente em: i) realização da cadeia de processamento SAR para obtenção de MDS por meio de radargrametria, de acordo com Fayard et al. (2007), Méric et al. (2009) e Toutin e Chenier (2009); ii) análise estatística para avaliar a acurácia vertical dos MDS provenientes dos modelos radargramétricos SARscape e Toutin, com os dados CSK e TSX, seguindo os procedimentos de Congalton e Green (2009), Galo e Camargo (1994), Jolliff et al. (2009) e Taylor (2001), conforme descrito no fluxograma (Figura 50).

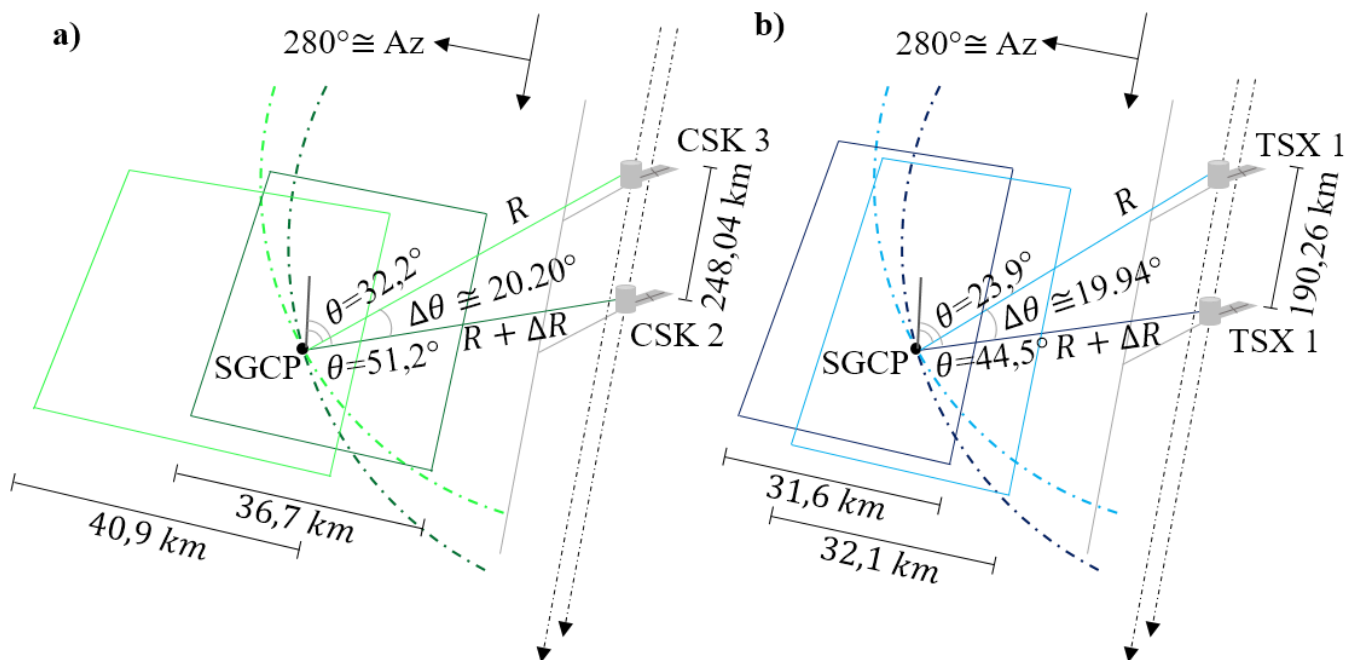
Figura 50 - Descrição dos procedimentos usados para aplicar modelos radargramétricos na ZCA.



5.4.3.1 Geometria de Aquisição SAR

Para selecionar pares radargramétricos, isso implica definir uma geometria de aquisição considerando uma orientação do terreno, o que acarreta em distorções geométricas intrínsecas como sombras, encurtamento de vertente ou inversão de relevo. Na verdade, admite-se um ângulo de incidência que pode ser íngreme ou raso para passagens ascendentes e descendentes, em um determinado momento. Na seleção dos pares radargramétricos, deve-se considerar o ângulo de intersecção, que deve ser tão grande quanto possível, para melhorar a resolução vertical, maximizando a paralaxe estereoscópica, e por outro lado, os modelos estereoscópicos exigem alta correlação cruzada em amplitude, para combinar o par estereoscópico com similaridade radiométrica (TOUTIN, 2002; TOUTIN; GRAY, 2000). As geometrias de aquisições radargramétricas foram definidas para 2 tratamentos (configurações), correspondendo aos dados SAR CSK (Figura 51a) e TSX (Figura 51b), ambos com visada de mesmo sentido com ângulo de intersecção maior que 7° , adquiridas durante a estação chuvosa.

Figura 51 - Geometria de aquisição radargramétrica em mesmo sentido para o CSK e TSX, adquiridos entre 2 e 7 de abril 2016 e 25 e 30 de março de 2016, respectivamente.



5.4.3.2 Modelos Radargramétricos

A radargrametria foi formulada a partir de uma aproximação aos princípios geométricos da fotogrametria com pares estéreo, portanto, há ajustes geométricos que relacionam as distorções topográficas e a interseção de feixes concêntricos circulares, projetados na faixa inclinada pelo cone Doppler (POLIDORI, 1997). Os modelos radargramétricos assumem essencialmente os parâmetros do radar (comprimento de onda, antena, ângulo de incidência, etc.), vetor de estado (posição, velocidade e atitude da plataforma) e sistema de referência terrestre (elipsoide, geóide e projeção) (MÉRIC et al., 2009). Vários modelos radargramétricos foram derivados das clássicas equações *Range-Doppler* como Leberl (1990) ou por restrições físicas analíticas como Toutin (2004).

Recentemente, os modelos radargramétricos têm levado em conta os processos geométrico-físicos de aquisição de imagens com modelagem matemática rigorosa ou por funções polinomiais racionais fornecidos pelos sistemas SAR (TOUTIN; CHENIER, 2009), melhorias em janelas de busca baseadas em correlação cruzada normalizada (HE et al., 2010; MERIC et al., 2011), precisão inicial de geocodificação aliada as técnicas de processadores paralelos massivos (BALZ et al., 2013), utilização de imagens estéreo por múltiplos feixes (N=3) (RAGGAM et al., 2010) e, procedimentos críticos de orientação e correspondência (CAPALDO, 2013; CAPALDO et al., 2011, 2015).

Para os usuários SAR no campo da aplicação de radargrametria, existem várias iniciativas em desenvolvimento e atualização contínua, sendo notáveis: i) a ferramenta científica *Software per Immagini Satellitari ad Alta Risoluzione* (SISAR) da Universidade de Roma La Sapienza, o qual tem uma abordagem hierárquica grosseira a fina que realiza a estratégia de correspondência baseada por busca em voxels (arranjo de elementos discretos no espaço tridimensional) (CAPALDO et al., 2015); e, ii) ferramentas comerciais como Erdas Imagine, Gamma, PCI Geomatics e SARscape que variam entre si em compatibilidade para tratar os sistemas SAR atuais, procedimentos de geocodificação, correção de órbitas precisas, estratégia de reconstrução tridimensional com diferentes parâmetros de orientação, correspondência, refinamento, uso de pontos de controle e tipo de terreno (plano, ondulado e montanhoso).

Os objetos deste experimento são os modelos radargramétricos do SARscape e Toutin os quais têm diferentes reconstruções tridimensionais para a estimativa da altura relativa residual e, respectivamente, tem base em propriedades coerentes do radar e restrições

geométrico-físicas. Além disso, observa-se menos especificações técnicas e científicas disponíveis para replicá-los, ambos têm proteção comercial.

Os modelos radargramétricos considerados recomendam que o par estereoscópico seja adquirido em mesmo sentido com ângulo de interseção mínimo de 15° , tais como neste estudo. Ambos os modelos radargramétricos não desempenhem satisfatoriamente visadas em lados opostos, e dependendo da abordagem radargramétrica, é permitido ângulos de interseção em pelo menos 7° (PCI GEOMATICS, 2016; SARMAP, 2016a). A coleta de SGCP foi um passo crítico na cadeia radargramétrica, porque deve ser fornecida uma coordenada confiável do terreno que é assumida sobre a imagem SAR projetada em alcance inclinado, com a amplitude da altimetria e planimetria bem distribuída. Para fins de comparação, foi aplicado o mesmo conjunto de SGCP nos modelos radargramétricos do SARscape e Toutin, estes gerados a partir dos conjuntos de dados CSK e TSX e observando as posições em alcance e azimute.

O modelo radargramétrico do SARscape gera MDS assumindo uma superfície topográfica conhecida (MDE a priori ou referência de altura) atrelada ao par mestre e serva de cenas SAR coregistradas. Deste modo, a topografia residual é estimada durante o processo de correspondência, através da correlação cruzada normalizada em amplitude e posterior solução das equações *Range-Doppler*, em aquisição dual de antenas (SARMAP, 2016a). Nesta abordagem, é perceptível o papel da correlação cruzada normalizada em amplitude e do ajuste realizado pelas equações *Range-Doppler*, este último descrito em Goblirsch e Pasquali (1996) como:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta R = R_q - R_p = \frac{\Delta\phi\lambda}{4\pi} \\ |p_t(t_p) - x_t(t_p)| = R_p \\ (x_v(t_p) - p_v(t_p)) \cdot (p_t(t_p) - x_t(t_p)) = R_p |x_v(t_p) - p_v(t_p)| \text{sen } \Psi_p \\ |q_t(t_q) - x_t(t_q)| = R_q \\ (x_v(t_q) - q_v(t_q)) \cdot (q_t(t_q) - x_t(t_q)) = R_q |x_v(t_q) - q_v(t_q)| \text{sen } \Psi_q \end{array} \right. \quad (41)$$

Sendo que:

R_p : pixel na imagem mestre;

R_q : pixel na imagem serva;

$\Delta\phi$: diferença de fase desdobrada;

λ : comprimento de onda;

x_t : posição do ponto imageado no terreno (x,y,z);

x_v : velocidade do ponto imageado no terreno

$p_v(t_p)$: velocidade da antena na aquisição mestre;

$q_v(t_q)$: velocidade da antena na aquisição serva;

$p_t(t_p)$: posição da antena na aquisição mestre;
 $q_t(t_q)$: posição da antena na aquisição serva;
 Ψ_p : ângulo *squint* processado no trajeto da aquisição mestre;
 Ψ_q : ângulo *squint* processado no trajeto da aquisição serva;

As equações *Range* assumem duas esferas centradas nas posições de imageamento dos dois trajetos das antenas. As equações *Doppler* assumem cones com suas pontas partindo da posição de imageamento e seus eixos apontando a direção de velocidade dos vetores. Na posição de ângulo *squint* zero ocorre o zero Doppler da plataforma.

Existem muitos critérios para buscar alvos de radar homólogos. Meric et al., (2011) reportaram que abordagens por múltiplas janelas móveis levam vantagens, por combinar a correlação de superfícies em diferentes níveis de pirâmide. Por esta razão, o processo de correspondência no modelo do SARscape executa a mesma estratégia piramidal que inicia a estimativa de deslocamento da paralaxe em estágios grosseiros para finos através de imagens SAR com *multilook* ou em único *look* de forma interativa (SARMAP, 2016a).

O par estereoscópico mestre e serva foi definido em função do ângulo de incidência. Desta forma, cenas de incidências rasas do CSK e TSX foram as imagens de referência, e também, o *multilook* e o espaçamento de pixel foram derivados destas imagens mestres com 5 e 6 looks quadrados projetados no terreno, respectivamente. Nenhum MDE auxiliar foi utilizado previamente, apenas uma altura de referência definida em zero. O modelo do SARscape tem efeitos significativos sobre a precisão do MDS em consequência do limiar de correlação cruzada e as escolhas dos SGCP. Portanto, para os modelos radargramétricos do CSK e TSX, foi aplicado o limiar de correlação cruzada de 0,2, para o co-registro, e limiar de 0,3 para a estimativa de deslocamento da paralaxe no processo de correspondência, utilizou-se uma janela de busca de 7x7. Depois disso, foi necessário estimar o deslocamento residual topográfico refinado e aplainado, que consiste em eliminar o deslocamento da paralaxe incerta e *outliers* com base na correlação cruzada, na estimativa de deslocamento na direção de alcance e nos SGCP coletados. SARMAP (2016b) recomenda aplicar SGCP localizados em toda amplitude de altura e ao longo de áreas com alta coerência, assim para os modelos radargramétricos do CSK e TSX foram coletados 12 SGCP para performance completa e 3 SGCP para performance mínima.

A conversão de deslocamento para altura foi estimada para o nível acima da média dos mares, este baseado na topografia residual, observada na direção em alcance. Em adição, as equações *Range-Doppler* foram aplicadas nos pares estereoscópicos, para recuperar as coordenadas geocodificadas com reamostragem de 12 metros projetadas no terreno.

O modelo de Toutin realiza a reconstrução tridimensional com base em informações precisas geométrico-físicas e metadados da aquisição SAR para gerar a geometria epipolar. Para tanto, há critérios de correlação cruzada normalizada em amplitude, e inclui-se a modelagem de distorções geométricas, efemérides, integração de tempo, referências geoide-elipsoidal e projeção cartográfica (TOUTIN, 2004).

O OrthoEngine é a ferramenta fotogramétrica do pacote PCI Geomatics que lida com a produção de MDS. O modelo de Toutin é um modelo matemático rigoroso desenhado por princípios de colinearidade e coplanaridade para compensar distorções geométricas e calcular posição e orientação em imagens SAR, usa pelo menos 8 SGCP para calcular parâmetros desconhecidos. Além disso, o modelo de Toutin é considerado por PCI GEOMATICS (2016) um modelo analítico restritivo típico capaz de usar informação de órbita SAR para diminuir o número de SGCP.

Toutin (2003, 2004) descreve a relação entre as coordenadas tridimensionais associadas às coordenadas da imagem, isto é dado pelas equações a seguir:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_p + y(1 + \delta_\gamma X) - \tau H - H_0 \Delta T^* = 0 \\ X + \theta \frac{H}{\cos \chi} + \alpha q \left(Q + \theta X \frac{H}{\cos \chi} \right) - Q \Delta R = 0 \\ X = (x - ay) \left(1 + \frac{h}{N_0} \right) + by^2 + cxy \\ H = h - \frac{x^2}{2N_0} \end{array} \right. \quad (42)$$

sendo que:

H : elevação do ponto corrigido para a curvatura da Terra;

H_0 : elevação do satélite;

N_0 : normal ao elipsoide;

a : rotação da Terra;

α : campo de visada instantâneo no pixel da imagem;

p, q : coordenadas no espaço imagem;

x, y, h : coordenadas no terreno;

P, Q : fatores de escala nas direções de alcance e azimute;

τ, θ : ângulos combinados de orientação do sensor como yaw, pitch e roll nas direções em alcance e azimute;

$\Delta T, \Delta R$: variações não lineares combinadas na atitude do sensor para yaw, pitch e roll nas direções em alcance e azimute;

$b, c, \chi, \delta_\gamma$: parâmetros de 2ª ordem relativos a geometria total considerando plataforma, sensor, Terra e projeção cartográfica.

Cada parâmetro no modelo de Toutin foi determinado na formulação matemática para recuperar a geometria SAR em relação a plataforma, o sensor, a superfície terrestre e a

referência cartográfica, incluindo os erros propagados desde o sinal bruto para estimar a projeção em alcance inclinado e a frequência *Doppler* até o produto final ortorretificado.

O modelo de Toutin utiliza imagens epipolares ou quase-epipolares para encontrar alvos homólogos no espaço imagem, e assim, resolver a reconstrução tridimensional. Portanto, foi necessário adquirir 12 SGCP para a performance completa e 8 SGCP para performance mínima. Apesar do fato que ao se coletar mais de 15 SGCP, isto não significa melhoras no modelo radargramétrico como exposto por Toutin e Chenier (2009). Oliveira et al. (2011) conseguiram resultados precisos com o mínimo de 8 SGCP. Depois de coletar o SGCP, foi possível verificar os erros prévios e em seguida calcular o modelo matemático.

Para criar imagens epipolares, foi necessário definir a imagem direita e esquerda, usando como critério o ângulo de incidência mais raso e, conseqüentemente, a melhor resolução espacial no terreno. Além disso, o fator de amostra epipolar foi ajustado para 1 o qual determina o nível de extração de informações dos pixels originais, aproveitando as cenas CSK e o TSX em nível primário SLC e desempenho de resolução espacial completo. A desvantagem ocorreu pelo fato de haver forte presença de efeito *speckle*, incompatibilidades de correspondência e *outliers* nos modelos radargramétricos, principalmente em alvos com menor correlação cruzada em amplitude, como observado nas aplicações de Balz et al. (2013) e Meric et al. (2011).

A extração de MDS pelo modelo de Toutin possibilitou definir os parâmetros finais que podem produzir efeitos de precisão como amostragem espacial e tipo de terreno (plano, colinoso e montanhoso). A amostragem espacial é o número de colunas e linhas consideradas para gerar o MDS em detalhe, o qual deve ser subamostrado em quatro ou cinco vezes a amostragem original, para minimizar o efeito *speckle*. Nos MDS CSK e TSX foi utilizado o fator de amostra 2 para células quadradas de 6,0 e 5,04 m, com *multilook* final projetado no terreno em 5 e 6 *looks*, respectivamente, produzindo uma célula de resolução projetada no terreno de 12 m. Toutin (2002) descreveu os maiores erros de MDS associados a terrenos acidentados e escarpados com comportamento do erro vertical quase linear, por isto, o tipo de terreno conveniente para área de estudo foi definido como relevo plano sem aplicação de filtros espaciais para preenchimento de buracos nos modelos radargramétricos.

5.4.3.3 Acurácia Vertical

Os MDSs radargramétricos elaborados pelos dados CSK e TSX foram avaliados quanto à acurácia vertical, por meio da estimativa das discrepâncias, testes estatísticos de T-Student e Qui-Quadrado, RMSE e LE90, além dos diagramas de Taylor e Alvo. Foram levantadas 40

observações GNSS de precisão horizontal e precisão vertical melhor do que 5,5 cm e 10,9 cm, respectivamente.

Os testes T-Student e Qui-Quadrado foram aplicados ao nível de confiança de 90% para testar a aderência dos subconjuntos amostrais das discrepâncias em relação a expectativa teórica do resíduo médio e dispersão tolerável, este último conforme aos limiares definidos no PEC-PCD em acordo a abordagem de Galo e Camargo (1994).

Os diagramas de Taylor e Alvo corroboram de forma complementar à análise de erro vertical absoluto fornecido pelo RMSE. Os parâmetros estatísticos contidos nos diagramas de Taylor e Alvo permitem compreender modelos estimados em relação a magnitude da variabilidade e o ajuste do comportamento das observações para medidas de referência (JOLLIFF et al., 2009). O diagrama de Taylor traz consigo uma síntese da precisão do modelo, ao relacionar observações estimadas e medidas que são exibidas em coordenada polar por meio dos parâmetros σ^* e ρ (TAYLOR, 2001). É esperado o erro vertical ter pouco viés e alta correlação para uma performance satisfatória, o qual os modelos são esperados em posição próxima a referência (1,1) no diagrama de Taylor.

O diagrama de Alvo avalia os modelos em função da predição obtida nas observações estimadas que podem conter subestimações ou superestimações por meio do B^* , além disso, é possível ter uma perspectiva normalizada da magnitude da dispersão que indicado no plano cartesiano predições minorados ou majorados da dispersão original contida no conjunto de referência dado pelo $uRMSE^*$.

5.4.4 Resultados e Discussões

5.4.4.1 Estereoscopia SAR

A geometria de aquisição SAR para a radargrametria contemplou como prioridade: i) paralaxe estereoscópica que significa a aparente mudança de um alvo observado a partir de posições distintas; e, ii) ângulo de intersecção ($\Delta\theta$) que é o ângulo formado pelas linhas de visadas a partir das plataformas de observação e tem relação estreita com a linha de base perpendicular (B_{\perp}), dando um limiar crítico para distinguir topografia residual e ruído (BAMLER, 2000; TOUTIN, 2002). Para garantir a obtenção de modelos radargramétricos consistentes, a correlação cruzada radiométrica na amplitude alcançou valores acima de 0,3, e da mesma forma, a razão entre base perpendicular e altura das plataformas (B_{\perp}/H) obteve valores dentro do intervalo de 0,25 a 2, em acordo com as abordagens de He et al (2010) e Méric et al (2009). Os principais parâmetros para a aquisição de SAR foram elencados na Tabela 23.

Tabela 23 - Parâmetros de geometria de aquisição SAR definidos para a estereoscopia das cenas CSK e TSX selecionadas.

Par Radargramétrico	CSK 2/3	TSX 1
Linha de Base Perpendicular (km)	248	190
Linha de Base Temporal (dias)	5	5
Ângulo de Intersecção (°)	20,196	19,935
Razão B_{\perp}/H	0,40	0,37
Altura de Ambiguidade (m)	5,01	3,48
Correlação Cruzada em Amplitude ($\bar{\gamma}_i$)	0,62±0,12	0,60±0,11

Portanto, as cenas CSK e TSX foram adquiridas em mesmo sentido executando órbitas descendentes para formar os pares estéreos, desta forma ocorreu menos disparidades radiométricas melhorando os processos de correspondência epipolar. Os modelos radargramétricos conseguiram cerca de 20° em $\Delta\theta$. Além disso, o limiar para solucionar a altura de ambiguidade fornecida por CSK e TSX satisfaz a resolução vertical de 3 e 6 m, para estimar o deslocamento vertical na paralaxe estereoscópica, respectivamente.

5.4.4.2 Acurácia Vertical dos MDSs Radargramétricos

Os MDSs radargramétricos foram elaborados de acordo com as abordagens radargramétricas dos modelos SARscape e Toutin para com os conjuntos de dados SAR Stripmap CSK e TSX. Para tanto, utilizou 12 SGCP para performance completa, e, 3 a 8 SGCP para performance mínima na elaboração dos modelos radargramétricos. Em adição, 40 ICPs foram utilizados para a avaliação de performance vertical. Os erros verticais absolutos dos MDSs radargramétricos foram descritos por meio das discrepâncias, RMSE e LE90 mostrados na Tabela 24.

Tabela 24 -Acurácia vertical para MDSs radargramétricos baseado em discrepâncias, RMSE e LE90.

SAR	Modelo	SGCP	ΔZ_{min} (m)	ΔZ_{max} (m)	$\overline{\Delta Z}$ (m)	$\sigma_{\Delta Z}$ (m)	RMSE (m)	LE90 (m)
CSK	SARscape	3	-9,96	10,97	0,64	4,39	4,38	7,21
		12	-8,10	11,09	0,05	4,40	4,34	7,14
	Toutin	8	-0,17	11,99	6,83	2,61	7,31	12,02
		12	2,93	12,93	7,33	2,58	7,76	12,76
TSX	SARscape	3	-2,97	11,93	2,96	4,13	5,04	8,29
		12	-3,41	10,32	2,58	4,05	4,75	7,82
	Toutin	8	-2,58	12,51	3,64	3,51	5,03	8,27
		12	-2,35	12,45	3,58	3,55	5,01	8,24

As discrepâncias verticais (ΔZ) em todos os MDS aparecem majoritariamente superestimadas com discrepâncias médias positivas ($\overline{\Delta Z}$). As discrepâncias mínimas (ΔZ_{min}) e máximas (ΔZ_{max}) devem ser relacionadas a erros verticais grosseiros ocorrendo em relevo extremamente plano ao lado da baía de Marajó em cota zero, e também, a falta de SGCP tomados em áreas vegetadas como em manguezais e floresta densa em cotas acima do dossel que podem alcançar entre 25 a 35 m de altura, com pouca penetrabilidade e mecanismo de retrospalhamento superficial na banda X. Os MDSs radargramétricos atingiram RMSE entre [4,34; 7,76] m e, conseqüentemente, LE90 entre [7,14; 12,76] m. O maior RMSE foi observado no MDS CSK Toutin, por outro lado, o menor RMSE foi observado em MDS CSK SARscape, portanto neste parâmetro estatístico o modelo radargramétrico do SARscape teve maior eficácia. Isto mostrou o potencial de mapeamento para todos os MDSs radargramétricos melhores em performance vertical do que os MDEs de fonte aberta disponíveis para a costa amazônica, especificamente, em termos de erro vertical absoluto e atualização de dados. Os MDEs SRTM elaborado em 2000 e ASTER GDEM elaborado entre 2001 e 2011, possuem

RMSE variando entre [3,2; 18,8] m, ao considerar vários tipos de cobertura da terra e relevo, como reportado por Szabó et al. (2015).

A precisão vertical fornecida pelos conjuntos de dados CSK e TSX foi da ordem de [4,34; 7,76] e [4,75; 5,04] m para RMSE, e, por conseguinte o LE90 entre [7,14-12,76] m e [7,82-8,29] m, respectivamente. Esses parâmetros de precisão vertical revelaram que o TSX foi mais adequado para gerar MDSs radargramétricos do que CSK, levando em consideração o pior caso de RMSE. O CSK teve o melhor e o pior RMSE mostrando flutuação na exatidão vertical, enquanto que o TSX teve mais estabilidade na reconstrução tridimensional que pode estar relacionada aos parâmetros orbitais e sincronização do tempo como relatado por Schubert et al. (2012). O modelo de Toutin, de caráter restritivo, parece ter tido dificuldades para a reconstrução tridimensional ao utilizar dados CSK se comparado ao TSX. De fato, estes resultados têm apoio nos estudos anteriores de Capaldo et al., (2011, 2015) que encontraram RMSE entre [3,8; 4,6] m para o CSK e [3,0; 3,9] m para o TSX, ambos em modo Spotlight (resolução espacial melhor que 2,5) ao utilizar modelos radargramétricos com 12 SGCP e sem nenhum SGCP, e também, o estudo de Oliveira et al., (2011) que utilizaram diferentes números de SGCPs entre 8 a 12, para elaborar MDSs a partir de imagens TSX Stripmap, alcançando RMSE de [6,3; 6,7] m, aplicados em floresta densa e relevo montanhoso.

É notável para os sistemas CSK e TSX mencionar: i) os satélites CSK 2/3 foram lançados em 2007 e 2008, respectivamente, a vida útil excedeu a expectativa nominal de 5 anos, se houvesse monitoramento contínuo da capacidade de geolocalização dos satélites, provavelmente, a acurácia posicional se comportaria significativamente diferente entre as plataformas, causado pelo desgaste temporal dos sistemas a bordo dos satélites em constelação; ii) o satélite TSX 1 é semelhante ao CSK em lançamento e vida útil, no entanto, esta plataforma permite obter órbitas precisas revisadas para entrega científica composto por 12 vetores de estado e o CSK entrega órbitas precisas filtradas com 15 vetores de estado (ASI, 2016b; DLR, 2013). A determinação de órbitas precisas incluindo todo o ajustamento diminuiu notavelmente a maior fonte de erro proveniente da posição de satélite como sustentado por Reigber et al. (1996) e Wermuth et al. (2012); e, iii) o CSK e o TSX forneceram precisão radiométrica com 1,0 e 0,6 db, respectivamente, de modo que valores mais altos trazem mais contribuições de erro para elaboração de MDSs radargramétricos durante a comparação estereoscópica e extração de altura para estimar pontos homólogos e topografia residual em amplitude (FAYARD et al., 2007; MERIC et al., 2011).

Os modelos radargramétricos de SARscape e Toutin geraram MDSs com RMSE entre [4,34; 5,04] m e [5,01; 7,76] m, e, por conseguinte o LE90 de [7,14; 8,29] e [8,24; 12,76] m

respectivamente, ao utilizar 3, 8 e 12 SGCPs. O modelo do SARscape permitiu alcançar as melhores precisões verticais dos MDSs radargramétricos se comparado ao modelo de Toutin, levando em consideração o pior caso de RMSE. O modelo do SARscape manteve os menores erros verticais, independente do sistema SAR considerado na reconstrução tridimensional. Por outro lado, o modelo de Toutin teve comportamentos alternados com pior precisão nos MDSs radargramétricos gerados pelos CSK. De fato, o modelo de Toutin mostrou resultados experimentais consistentes para a radargrametria, como mostram os estudos anteriores de Capaldo et al. (2011), Oliveira et al. (2011) e Toutin e Chenier (2009), nos quais os objetivos foram avaliar o erro vertical em diferentes tipos de relevo e sistemas SAR. Mais recentemente, Capaldo et al. (2015) realizaram uma comparação entre modelos radargramétricos por meio do pacote PCI Geomatics com RMSE de [4,0; 4,3] m e SISAR com RMSE de [3,0; 5,4] m, estas métricas obtidas em dados SAR de alta resolução no modo Spotlight.

Vale ressaltar para as abordagens radargramétricas executadas pelos modelos do SARscape e Toutin que: i) os produtos ortorretificados provenientes das imagens CSK e TSX não apresentaram distorções geométricas severas dado o relevo plano da costa amazônica e notado os ângulos de incidência entre $22,3^\circ$ a $52,0^\circ$; ii) não se utilizou de qualquer informação auxiliar fornecida por MDE prévio como SRTM, ASTER GDEM ou carta topográfica; iii) o pacote de ferramentas do modelo de Toutin tem tempo de desenvolvimento mais antigo do que o modelo SARscape o que pode ser considerado vantagem; e, iv) ambos apresentaram pouca documentação técnica, apesar de existir uma expectativa de precisão de radargrametria associada aos parâmetros de correlação cruzada em amplitude, comprimento de onda, efemérides precisas, linha de base, geometria epipolar e ângulo de incidência.

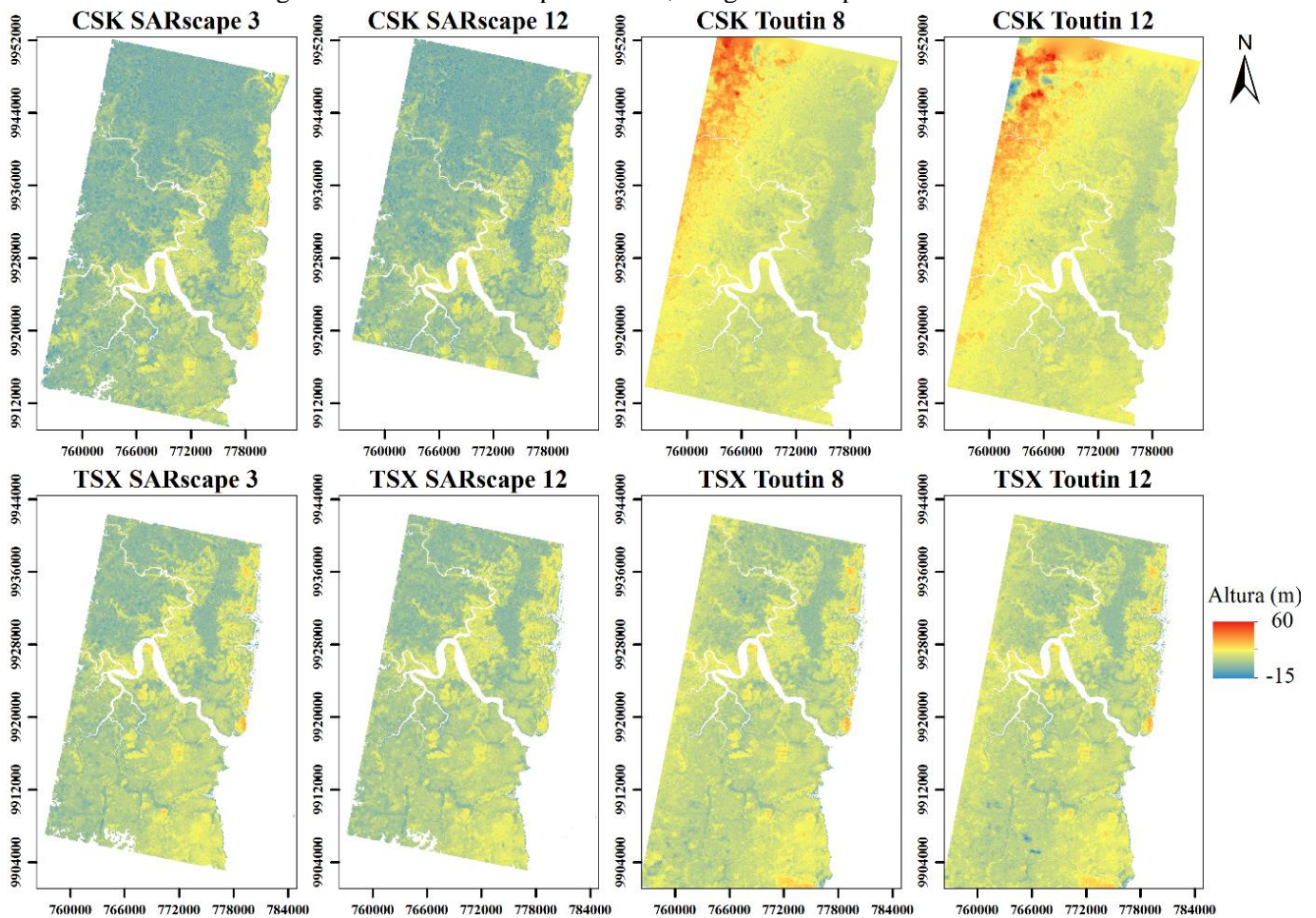
O modelo de Toutin baseia-se na geometria epipolar que reduz a complexidade da correspondência em amplitude, e assim, obtém-se comprovado ganho de precisão ao combinar estritamente equações *Range-Doppler* com modelagem dos sensores, consideração de atrasos atmosféricos, sinais geodinâmicos, dinâmica dos satélites e calibração geométrica como evidenciado por Gutjahr et al. (2014). Por este fato os dados TSX possam estar mais aptos a ter bom desempenho vertical no modelo de Toutin.

No caso da costa amazônica, Toutin (2002) descreve que relevos baixos e planos são livres de distorções geométricas e mais adequados para ampla variedade de ângulos de incidência, no entanto, estes relevos exigem maiores resoluções verticais com linhas de base ajustadas para distinguir ruído de gradientes topográficos suaves, como observado por Ferretti et al. (2007). O modelo do SARscape baseia-se em estratégia piramidal de busca por homólogos que pode ocorrer descasamentos relacionados com a relação sinal-ruído, logo pequenos erros

em alto nível piramidal podem ser propagados e ocasionar grandes erros em baixo nível piramidal, principalmente em terrenos planos como verificado por Balz et al. (2013).

Os MDSs radargramétricos tiveram dificuldades para gerar superfícies contínuas em baixos terrenos [0; 42] m e relevo plano a suave ondulado, principalmente em áreas com ausência de SGCP e próximas a grandes extensões de massa d'água, o que foi perceptível na distribuição espacial e na amplitude das alturas (Figura 52).

Figura 52 - MDSs radargramétricos para os dados CSK e TSX ,obtidos com os modelos radargramétricos do SARscape e Toutin, e organizados por número de SGCP.



Para diminuir as áreas não resolvidas ou *outliers*, as aplicações sugerem parâmetros mais flexíveis para resolução espacial (degradar entre 2 a 6 vezes a amostragem no terreno), *multilook* (entre 2 a 6 looks), limiares de correlação cruzada em amplitude (a partir de 0,3) e filtros para preencher pequenas lacunas. Ferretti et al. (1999; 2000), Toutin (2002) e Toutin e Gray (2000) recomendaram obter grandes linhas de base capazes de diminuir a altura de ambiguidade ao considerar metade ou terça parte da linha de base crítica. Em adição, os autores citados também recomendam escolher mais de um par estereoscópico para se observar o relevo

na vertente frontal e na vertente dorsal (menos preciso ao erro vertical). Visadas em sentido oposto devem aprimorar MDSs radargramétricos, desde que implementados nos aplicativos recentes.

Os MDSs radargramétricos foram submetidos aos testes do PEC-PCD. Estes testes estatísticos constataram a aderência dos conjuntos amostrais de discrepâncias, com base na normalidade e diferença mínima estatística, para intervalo de confiança (IC) de 90%, avaliando a existência de viés e a dispersão aceitável para uma escala cartográfica e classe de mapa específicos (Tabela 25).

Tabela 25 - Testes estatísticos para se obter a escala cartográfica segundos os requisitos do PEC-PCD para com os MDSs radargramétricos.

MDS	Shapiro-Wilk		T-Student		Qui-Quadrado		Escala	Classe
	IC	p-valor	IC	p-valor	IC	p-valor		
CSK SARscape 3 SGCP	-4,6-9,7	0,01	-0,5-1,8	0,36	13,8-29,3	0,82	1:25000	C
CSK SARscape 12 SGCP	-5,4-7,2	0,09	-1,1-1,2	0,94	13,8-29,3	0,83	1:25000	C
CSK Toutin 8 SGCP	3,3-10,0	0,98	6,1-7,5	0,00	4,9-10,4	0,68	1:10000	D
CSK Toutin 12 SGCP	3,5-12,4	0,46	6,6-8,0	0,00	4,8-10,1	0,64	1:10000	D
TSX SARscape 3 SGCP	-2,8-9,8	0,02	1,9-4,1	0,00	12,2-25,9	0,64	1:25000	C
TSX SARscape 12 SGCP	-1,6-10,9	0,01	1,5-3,7	0,00	11,7-24,9	0,57	1:25000	C
TSX Toutin 8 SGCP	-1,6-9,7	0,64	2,7-4,6	0,00	8,8-18,7	0,71	1:25000	B
TSX Toutin 12 SGCP	-2,1-8,4	0,66	2,6-4,5	0,00	9,0-19,1	0,74	1:25000	B

Os testes Shapiro-Wilk e T-Student garantem que o MDS elaborado se apresente com resíduos de aderência normal e livres de viés. A normalidade foi confirmada na maioria dos MDSs radargramétricos exceto pelo MDS CSK SARscape 3, MDS TSX SARscape 3 e MDS TSX SARscape 12. O teste de T-Student detectou a maioria dos MDSs radargramétricos com comportamento tendencioso para a expectativa $\bar{\Delta Z}$ em torno de zero, exceto pelos MDSs CSK SARscape. A tendência dos MDSs radargramétricos deve estar associada a consistência dos

modelos para determinar a altura por diversos motivos, tais como: extensas áreas planas, áreas inundadas, diferentes marés entre as aquisições, baixa amplitude altimétrica e alta diversidade de cobertura da terra com florestas densas, manchas de savana, campos, manguezais, praias e áreas urbanas.

Os modelos radargramétricos do SARscape e Toutin requerem SGCP em toda distribuição espacial da cena e amplitude altimétrica, no entanto, adquirir o sinal GNSS em meio de dossel fechado (25 a 35 m) se torna impraticável usando polos de antena com pequeno tamanho (2 m) ou abrindo clareiras de 12 por 12 m. Para solucionar este problema, observa-se que: i) o CSK e o TSX conseguiram alturas de ambiguidade da ordem de 3 e 5 m respectivamente, enquanto a altura na área experimental varia entre [0; 42] m. Portanto, o sistema SAR deve ser capaz de diminuir a altura de ambiguidade entre [0,5; 2] m através de linhas de base extensas e considerar aquisições no modo Spotlight e Ultrafine como realizado por Capaldo (2013), Capaldo et al. (2015) e Toutin e Chenier (2009); ii) a amostragem de SGCP e ICP deve contemplar a copa das árvores que são os pontos mais altos deste relevo plano e baixo; iii) utilizar múltiplos pares estereoscópicos para gerar modelo de altura de dossel florestal ou modelo de altura de objetos não topográficos tanto no manguezal quanto na terra firme o qual melhora a precisão do mapeamento como sugerido por Koyama et al., 2016 e Perko et al. (2011); e, iv) aplicar a $\overline{\Delta Z}$ por subtração para transladar as coordenadas estimadas com viés conforme recomendado por Galo e Camargo (1994).

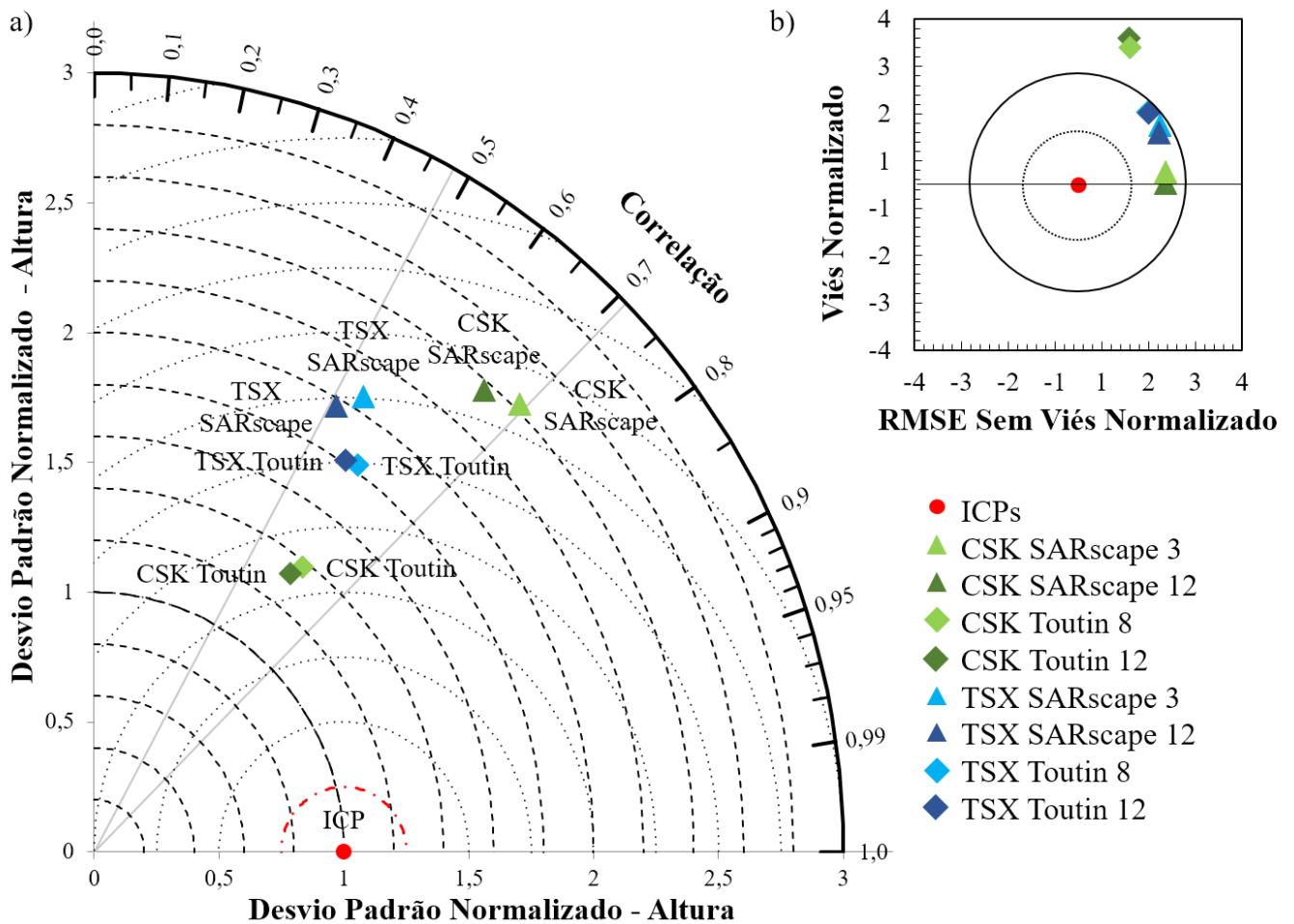
O teste Qui-Quadrado definiu a maior escala cartográfica dada pelo MDS CSK Toutin que alcançou escala cartográfica de 1:10000 para a classe D com o $\sigma_{\Delta Z}$ aceitável em 2,58 m, e também, a menor escala cartográfica foi fornecida pelo MDS CSK SARscape que alcançou escala cartográfica 1:25000 para a classe C com o $\sigma_{\Delta Z}$ aceitável em 4,40 m. Os modelos radargramétricos SARscape e Toutin ratificaram ser consistentes e precisos, de modo que elaboraram MDSs de precisão cartográfica melhor do que 1:100000 para classe A e 1:50000 para classe A, respectivamente. Foi perceptível que este estudo está em acordo com os resultados anteriores de Oliveira et al. (2011) que obteve MDS do TSX em modo Stripmap com escala cartográfica de 1:50000 para classe A em ambiente florestal montanhoso. Os MDSs radargramétricos fornecidos pelo CSK e TSX foram capazes de prover informações geomorfométricas para ZCA, possibilitando atualização cartográfica em detalhe para um conjunto mínimo de SGCPs e ICPs.

Os diagramas de Taylor e Alvo abordaram as questões gerais relacionadas à ordem e categorização do erro vertical, suportado pelos modelos radargramétricos deste estudo. Como mostrado na Figura 53(a), entre todos os MDSs radargramétricos, o MDS CSK SARscape

produziu o maior σ^* com [2,37; 2,46], controversamente, a mais forte ρ com [0,66; 0,70] que rendeu a posição mais longínqua da referência (ICPs), ou seja, isto significa menor precisão e maior RMSE. Em posição contrária, situou-se o MDS CSK Toutin por estar mais próximo dos ICPs com menor σ^* na ordem de [1,33; 1,38] e a segundo mais forte ρ com [0,59; 0,61], isto significa que a dispersão tem maior impacto na performance dos modelos radargramétricos do que a associação linear.

Ao levar em conta o diagrama de Alvo na Figura 53(b), o MDS CSK Toutin superestimou a altura apresentando o B^* de [2,90; 3,11] de posição mais afastada entre os MDSs radargramétricos, e também, houve estimativas de altura fora do intervalo inicial de 3 vezes a dispersão, proporcionando pelos ICPs, isto significa estar localizado no lado positivo do $uRMSE^*$ com [1,09; 1,11] no eixo das abscissas sendo $\sigma_{est} > \sigma_{med}$. O MDS CSK SARscape situou-se perto da referência ICP com B^* de [0,02; 0,27], no entanto, a dispersão foi a mais alta dentre os MDSs radargramétricos com $uRMSE^*$ de [1,86; 1,87]. Os MDSs radargramétricos provenientes do TSX conseguiram uma posição intermediária, esta caracterizada por superestimava da altura apresentando em B^* de [1,09; 1,54]. Além disso, o $uRMSE^*$ de [1,49; 1,75] ocorreu dentro da abrangência de 2 vezes a dispersão inicial fornecida por ICPs.

Figura 53 - Diagramas de Taylor e Alvo gerados para alocar os MDSs radargramétricos segundo os erros verticais para com as observações GNSS de referência levantadas em campo.



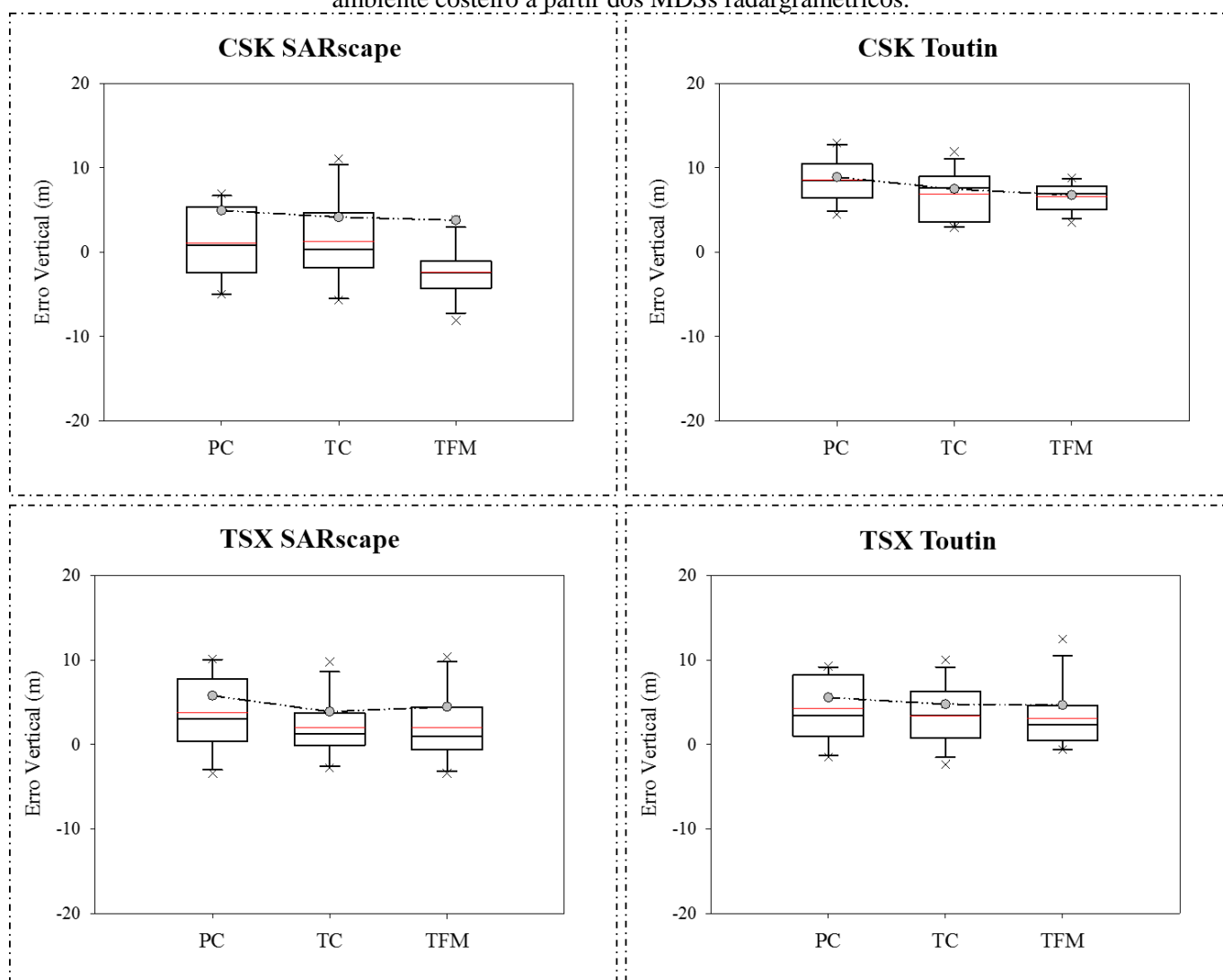
De forma geral para os diagramas de Taylor e Target, o modelo radargramétrico do SARscape alternou posições para com os parâmetros de erros verticais por vezes mais baixos e mais altos, enquanto o modelo de Toutin situou-se entre posições intermediárias a menores erros verticais. Portanto, se o objetivo for melhorar a performance para o σ^* e ρ e diminuir o impacto do B^* e $uRMSE^*$, ou seja, aumentar a concordância dos modelos radargramétricos na magnitude e variabilidade das alturas medidas no terreno, deve-se ter aquisições SAR rigorosas para determinações de efemérides, geocodificação, sincronização de sistemas e linha de base espacial e temporal, além de considerar as características da paisagem na modelagem tridimensional com opções de tipo de relevo, ambientes de comportamento incoerente, correspondência para baixa correlação, modelagem de dossel florestal e objetos não topográficos. Iniciativas para melhorar modelos radargramétricos devem considerar a importância do processo de correspondência o qual deve ocorrer em nível de subpixel com retificação de imagens epipolares, estratégia hierárquica para buscar homólogos em *voxel* e

emprego de múltiplos núcleos de correlação cruzada normalizados para estimar similaridade (CAPALDO et al., 2015; GUTJAHR et al., 2014; MERIC et al., 2011).

5.4.4.3 Acurácia Vertical dos Ambientes Costeiros

Os MDSs radargramétricos permitiram descrever os ambientes costeiros amazônicos com referência nos 40 ICPs medidos com GNSS e seus respectivos atributos de altimetria, classe, coerência e erro vertical. A estratégia de amostragem do trabalho de campo levou em conta 13 ICPs para a Planície Costeira (PC), 14 para o Tabuleiro Costeiro (TC), 13 ICPs para o Terraço Fluviomarinho (TFM). A descrição do erro vertical provenientes dos modelos radargramétricos por ambiente costeiro é apresentada na Figura 54.

Figura 54 - Características do erro vertical em discrepância (box plot) e RMSE (linha tracejada) por ambiente costeiro a partir dos MDSs radargramétricos.



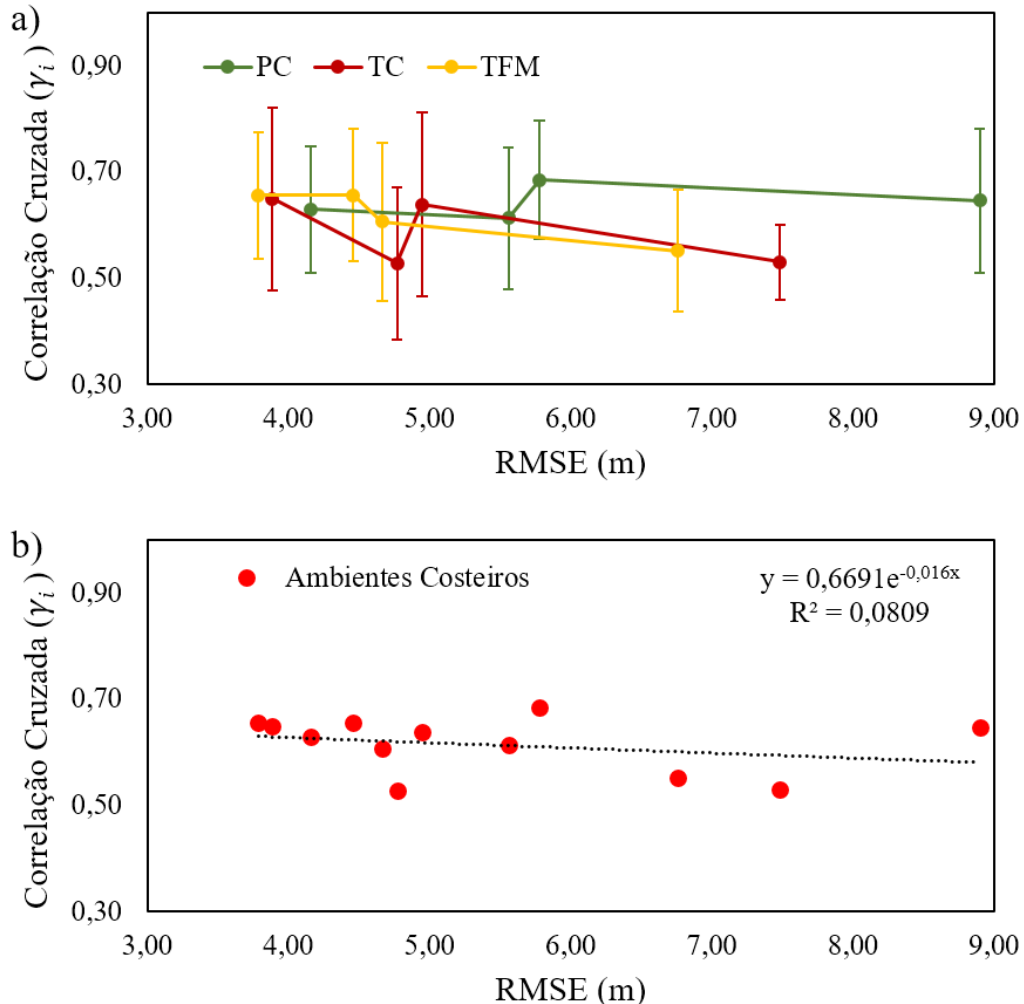
Para todos os modelos radargramétricos e sensores SAR, foi perceptível que o maior erro vertical ocorreu na PC com ΔZ entre $[-5,03; 12,93]$ e RMSE entre $[4,16; 8,90]$ m, este deve estar atrelado ao efeito do dossel de florestas e manguezais. Os menores erros verticais ocorreram no TC e TFM, estes respectivamente com ΔZ de $[-5,66; 11,90]$ m e $[-8,10; 12,45]$ m, e RMSE de $[3,89; 7,48]$ m e $[3,79; 6,76]$ m, estes ambientes costeiros se caracterizam por ter menos cobertura florestal de dossel elevado e fechado, áreas de solo exposto com campos naturais e uso agropecuário, e também, áreas urbanas. Apesar da maior fonte de erro vertical no terreno ser fornecida em função da variação da declividade, de acordo com Szabó et al. (2015) e Toutin (2002), as características da paisagem costeira amazônica tiveram suficiente efeito de indução no padrão espacial do erro vertical dos MDSs radargramétricos, semelhantes aos efeitos já observados no MDE da missão TanDEM-X por Wessel et al. (2014) e na missão SRTM por Rodríguez et al. (2006). As atuais iniciativas para gerar MDE devem prever mecanismos para remover artefatos não topográficos como altura da vegetação e estruturas artificiais para fins de melhorias no erro vertical, como exemplificado por O'Loughlin et al. (2016) que reprocessou o MDE SRTM para um novo MDT ao nível do terreno e assim diminuiu o RMSE para 6 m.

O limiar médio de correlação cruzada em amplitude ($\bar{\gamma}_i$) para todos os ambientes costeiros foi entre $[0,59; 0,65]$, de tal forma que a menor γ_i ocorreu para TC com $[0,31; 0,99]$ e a maior γ_i ocorreu para PC com $[0,39; 0,88]$. A PC possui majoritariamente áreas cobertas por vegetação densa de manguezais o qual manteve valores elevados de γ_i , isto configurou principal vantagem da técnica radargramétrica para elaborar MDSs nos ambientes costeiros amazônicos de comportamento incoerente, em detrimento do uso de interferometria SAR de passagem múltipla com única revisita ($N=2$). O γ_i é um requisito para correspondência epipolar de pares estéreos, porém este parâmetro isolado não garante por si só precisão vertical, a estimativa de topografia residual na distância em alcance deve ser realizado com contribuições reais do terreno. Os MDSs radargramétricos baseados no modelo de Toutin sugerem ter mais tolerância para resolver pixels com valores baixos de γ_i na maioria das amostras de ambientes costeiros, enquanto que os modelos radargramétricos do SARscape sugerem maior precisão do valor médio de altura e melhor detalhamento do terreno em bordas, mudanças de cobertura da terra e acidentes de relevo.

A Figura 55(a) mostrou um padrão linear decrescente da γ_i em relação ao RMSE por ambiente costeiro, entretanto é esperado em condições modeladas que curvas teóricas de precisão vertical tenham comportamento representado por um função exponencial decrescente

assintótica o que não ocorreu para a Figura 55(b). Esta afirmação foi constatada na linha de tendência exponencial que obteve coeficiente de determinação de 0,08 e correlação de 0,28.

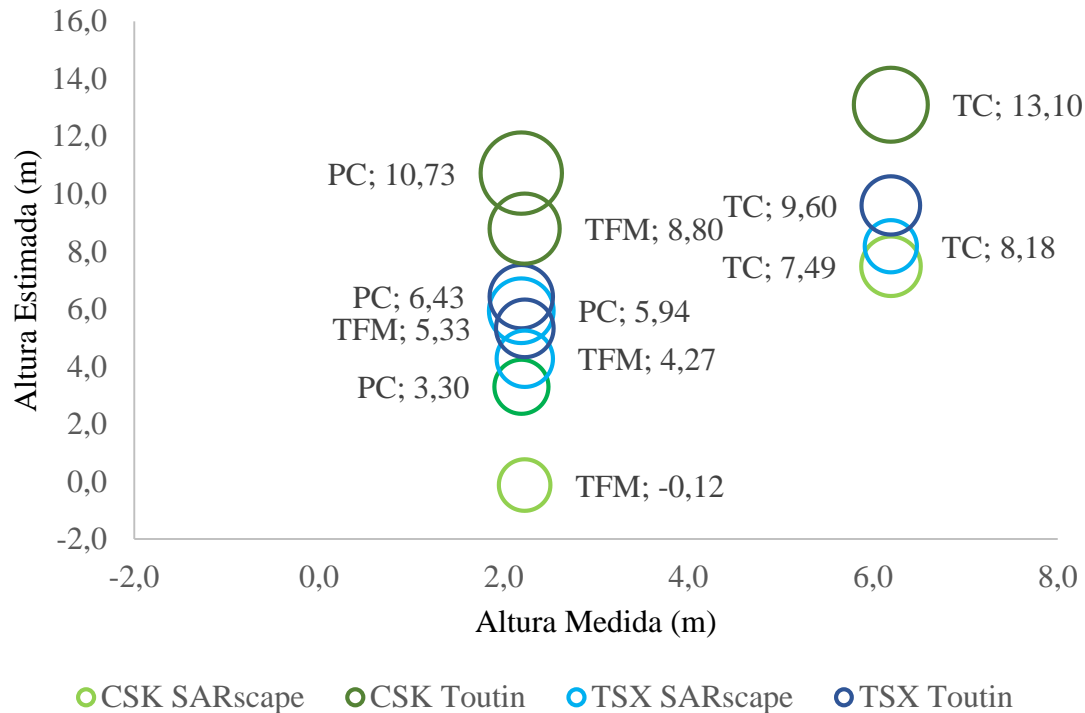
Figura 55 - Caracterização da correlação cruzada em amplitude, RMSE vertical e linha de tendência exponencial gerado para os ambientes costeiros amazônicos com pontos levantados em campo.



Para enfatizar a diferença de ambientes costeiros em relação aos níveis topográficos e a acurácia vertical, foi utilizado o gráfico de dispersão entre \bar{Z}_{est} e \bar{Z}_{med} , e também, o tamanho das esferas plotadas ponderado pelo RMSE (Figura 56). Os \bar{Z}_{med} foram dados por levantamento GNSS, apresentando 6,5 m, 2,7 m e 2,6 m, respectivamente para o TC, TFM e PC, estes delimitados por três níveis topográficos em ordem decrescente de altimetria, como descrito em estudos morfológicos anteriores na ZCA de El-Robrini et al. (2006), França e Filho (2006) e França et al. (2007). Os MDSs radargramétricos permitiram discriminar os níveis topográficos dos ambientes costeiros amazônicos, sob perspectiva de altura de ambiguidade entre 3,48 a

5,01, mas a PC mostrou-se ambígua com TC e TFM, por influência do dossel florestal nos manguezais, tendo indevidamente se situado na posição de nível topográfico mais elevado.

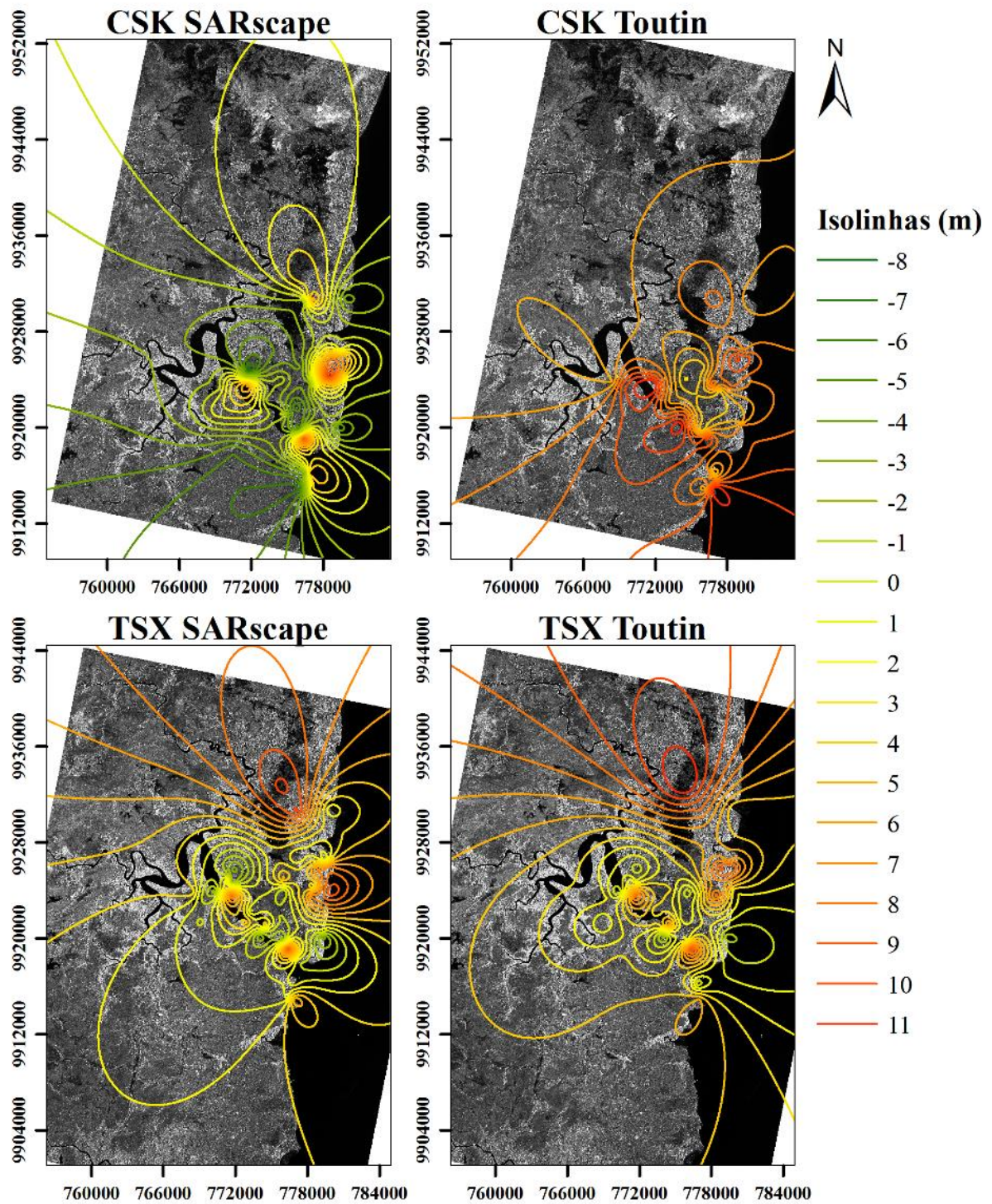
Figura 56 - Gráfico de dispersão para as alturas estimadas (\bar{Z}_{est}) e medidas (\bar{Z}_{med}) com esferas proporcionais ao RMSE obtido na avaliação de acurácia vertical dos MDSs radarométricos.



O padrão de distribuição espacial de erros verticais foi mostrado na Figura 57 por meio de mapas de isolinha de erro. Os MDSs do modelo do SARscape obtiveram a maior dispersão de erros verticais com isolinhas entre [-8; 11] m, opostamente, os MDSs do modelo de Toutin apresentaram isolinhas entre [-2; 11] m. Portanto, os pontos críticos de o erro vertical foram ocorrências de superestimação, alocadas ao longo da linha de costa, rios e canais de maré meandantes na margem leste da baía de Marajó, especificamente no ambientes costeiro da PC. As fontes de erros estão distribuídas por áreas de manguezais, planícies de intermaré, pântanos salinos, falésias ativas e barras arenosas em contato de ondas e maré. Outras fontes notáveis de erro vertical ocorreram nas bordas TC em contato com TFM, estes ambientes costeiros situados na porção mais ao norte da área de estudo, especificamente, em campos alagados e planícies de supamaré, e ainda, ao longo do rio Paracauari, na porção central da área de estudo, resultado da dificuldade de detalhar as falésias ativas e a massa d'água, em função da resolução vertical dos modelos radarométricos. Este padrão espacial de erros verticais sugere demandar sistemas SAR mais precisos e de maior resolução espacial, de forma a ampliar o nível de detalhe e manter

uma atualização cartográfica semestral a anual nos ambientes costeiros amazônicos, principalmente pela forte dinâmica costeira de acreção e erosão nos manguezais sob taxas de $160,92 \text{ km}^2 \cdot \text{ano}^{-1}$ e $101,04 \text{ km}^2 \cdot \text{ano}^{-1}$ respectivamente, registradas por Nascimento et al. (2013).

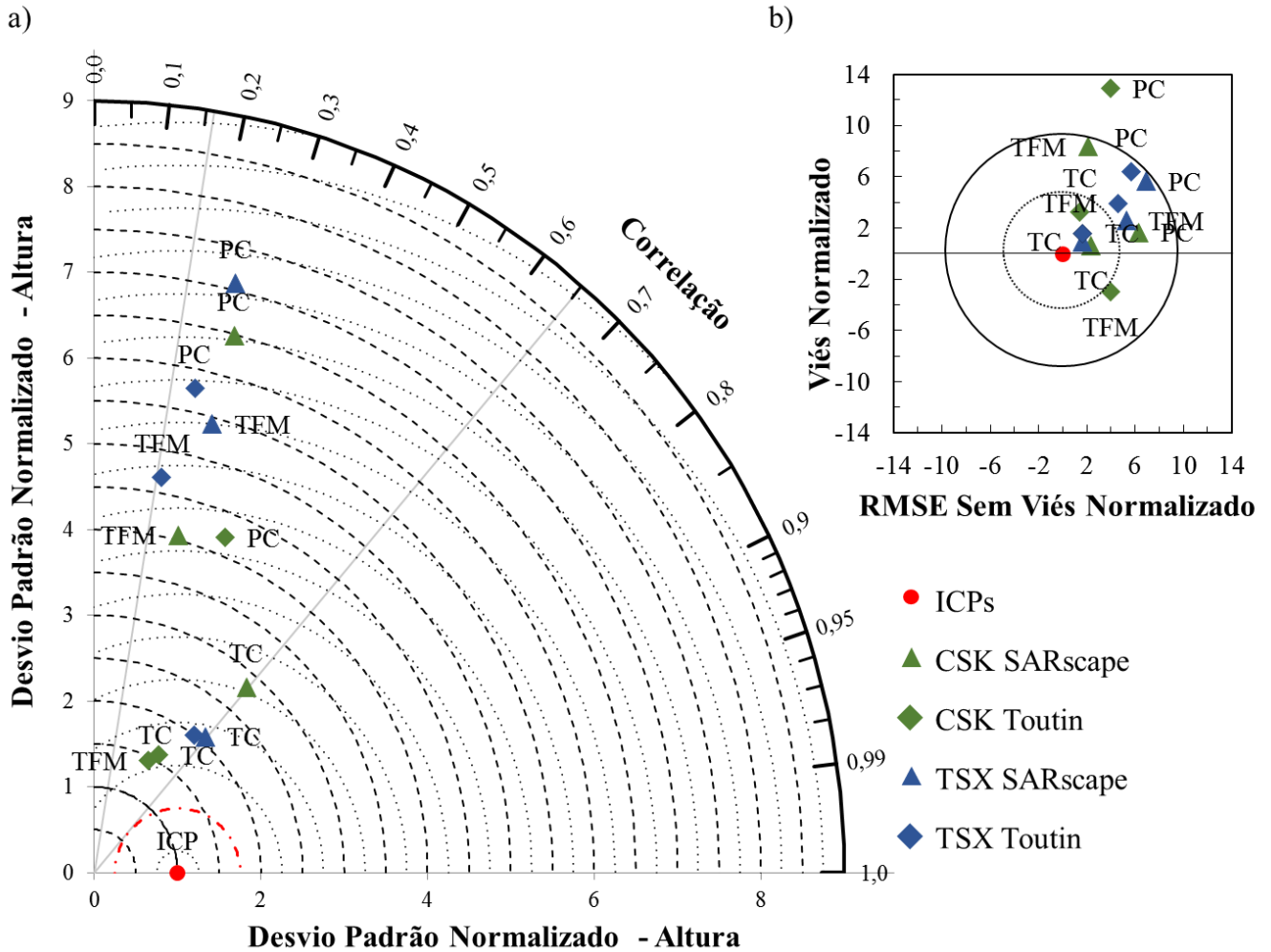
Figura 57 - Mapas de isolinha de erro retornando o padrão de distribuição espacial dos erros verticais por MDS radargramétrico.



O diagrama de Taylor na Figura 58(a) foi elaborado com base nos modelos de radargramétricos e categorizado pelos ambientes costeiros amazônicos. A PC produziu os maiores valores σ^* entre [4,21; 7,08], e também obteve fraca ρ entre [0,21; 0,37], o que significa valores pouco ajustáveis a magnitude e a dispersão dos dados de referência que a torna o ambiente costeiro de maior dificuldade para o mapeamento altimétrico. O alto σ^* e a baixa ρ foram efeitos de objetos não topográficos como a copa das árvores de manguezal que devem ter contaminado a resposta de retroespalhamento dentro ou muito próximo da célula de resolução do MDS radargramétrico em 12 m. Vale ressaltar que ambos os modelos radargramétricos reamostraram o pixel original de 3 m, e este processo inclui diversos elementos na direção de visada do radar (neste caso descendente) e na direção de azimute. Controversamente, TC situou-se mais próximo dos ICPs com o menor σ^* entre [1,57; 2,83] e também a mais forte ρ entre [0,49; 0,64], isto significa que o mapeamento altimétrico foi mais satisfatório com concordância entre a diferença de fase angular dos dados estimados e medidos e também valores próximos de magnitude da altura. O TC foi o ambiente costeiro amazônico mais fácil para a elaboração de MDSs radargramétricos por ter majoritariamente feições homogêneas de solo exposto, áreas desmatadas e estruturas artificiais como estradas, edificações e áreas construídas. O TFM situou-se em uma posição intermediária para os parâmetros de erros verticais do diagrama de Taylor com σ^* entre [1,46; 5,42] e ρ entre [0,17; 0,45].

O diagrama de Alvo na Figura 58(b) revelou a PC como o ambiente costeiro de maior superestimação da altura com B^* entre [1,67; 12,88]. O TFM apresentou para o MDS CSK SARscape a característica de subestimação da altura com B^* de -2,99, os demais MDSs radargramétricos superestimaram a altura para com B^* na ordem de [0,60; 12,88]. A dispersão dos erros verticais nos ambientes costeiros esteve fora da dispersão inicial fornecida pelos ICPs com $uRMSE^*$ entre [1,39; 6,91], isto significa que a variabilidade estimada foram maiores do que a variabilidade medida ($\sigma_{est} > \sigma_{med}$), ao se observar o eixo das abcissas, e as variabilidade mais dispare foram para a PC e TFM com $uRMSE^*$ na ordem de [3,95; 6,91] e [2,11; 5,25] respectivamente. O TC teve o comportamento mais próximo ao centro do diagrama de Alvo composto pelo par ordenado dos parâmetros de B^* entre [0,60; 3,23] e $uRMSE^*$ entre [1,39; 2,32].

Figura 58 - Diagramas de Taylor e Alvo para os ambientes costeiros amazônicos alocando posições segundo os parâmetros de erro verticais nos MDSs radargramétricos para com a referência de observações GNSS em campo.



As questões predominantes que melhoram a qualidade dos modelos radargramétricos permanecem na amostragem de feições confiáveis, e assim deve-se considerar o mecanismo de retroespalhamento predominante bem como reconhecer monoscopicamente os alvos, ou seja, delinear a estratégia de amostragem de SGCP e ICP. As novas iniciativas de reconstrução tridimensional por radargrametria devem prever a modelagem de artefatos não topográficos (artificiais e naturais), tipo de relevo, boa distribuição espacial (planimétrica e altimétrica), filtragem speckle, tomadas de visada oposta e correspondência epipolar em voxel ao nível de subpartes. Em adição, a geometria de aquisição SAR precisa minorar a dependência por SGCP em favorecimento dos sistemas de determinação de órbita e referencial terrestre, e assim, resolve de maneira direta o refinamento e a conversão em alturas absolutas como discutido nos estudos anteriores de Balz et al. (2013), Capaldo et al. (2015), Koyama et al. (2016) e Meric et al. (2011).

5.4.5 Conclusões

Os conjuntos de dados CSK e TSX, adquiridos em resolução espacial de 3 metros e revisita de 5 dias, permitiram mapear o relevo plano dos ambientes costeiros amazônicos e extrair informações geomorfométricas mais detalhadas, sob condições de severas chuvas (33 mm.dia^{-1}) e intensa hidrodinâmica (macromarés), produzindo MDSs com superfície majoritariamente contínuas com amostragem no terreno de 12 m.

As precisões verticais do CSK e TSX alcançaram desempenho similar, de acordo com os testes estatísticos preconizados pelo PEC-PCD. Os MDSs mais precisos dados pelos sistemas CSK 2/3 e TSX 1, nas escalas cartográficas de 1:50.000 e classe de mapa A resultaram em RMSE de 4,34 e 4,75 m, respectivamente. Houve flutuações na precisão dos modelos gerados a partir dos dados CSK e o TSX, como mostraram as análises dos diagramas Taylor e Target, mas o TSX se mostrou mais estável pelas estatísticas utilizadas. É importante levar em consideração outros parâmetros para a compreensão da qualidade geométrica e propagação de erros produzidos pelo sistema SAR, como radiometria e vetor de estado, e o efeito do tipo de terreno e cobertura da terra. As novas iniciativas para avaliar a precisão posicional devem considerar refletores de canto, amostragem estratificada, altura a partir de feições não-topográficas, outros sistemas sensores SAR com percepção espacial detalhada nos modos Spotlight, e o uso mais de um par estereoscópicos em diferentes linhas de visada.

Os modelos radargramétricos de SARscape e Toutin devem ser considerados semelhantes em desempenho para precisão vertical, pois eles têm intervalos de precisão compartilhados em todas as abordagens utilizadas. O modelo de Toutin parece ter uma vantagem no processo de correspondência dada a precisão cartográfica e o controle da variabilidade de erro no modelo tridimensional. O SARscape desenvolveu MDSs radargramétricos mais detalhados em termos de forma de relevo, notou-se que a resolução espacial mantida nos modelos SARscape é significativamente mais fina do que a do modelo Toutin. Novas iniciativas devem considerar para avaliar produtos derivados geomorfométricos. De qualquer forma, os modelos SARscape e Toutin provaram ser ferramentas robustas para realizar a radargrametria, considerando a correlação cruzada em amplitude e a geometria de aquisição SAR precisa, os quais diminuiriam a dependência para grande número de SGCP.

A precisão vertical aplicada nos ambientes costeiros amazônicos mostrou que os ambientes mais precisos foram dados pelo Tabuleiro Costeiro e Terraço Fluviomarinho que atingiram o RMSE mais baixos, os quais alcançaram RMSE melhor do que 7,48 m, desconsiderando o sistema SAR ou o modelo radargramétrico. Portanto, o ambiente costeiro

mais complicado a mapear foi o Planície Costeira, que atingiu um RMSE melhor do que 8,90 m com erro principalmente relacionado a áreas de manguezais e na linha de costa atual. Notou-se que o Tabuleiro Costeiro foi o ambiente costeiro mais adequado aos modelos radargramétricos, considerando as posições mais próximas em relação à altura de referência dos ICPs, estes suportados pelo uso dos diagramas de Taylor e Alvo.

Os conjuntos de dados SAR CSK e TSX e os modelos radargrammetric SARscape e Toutin forneceram um satisfatório nível de mapeamento dos ambientes costeiros amazônicos, face a perspectiva em banda X, incidência íngreme a rasante e poucos conjuntos de amostras em SGCP e ICP. Eles demonstraram o potencial para monitorar a topografia em um nível detalhado de escala espacial e temporal.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

Os resultados experimentais permitem aceitar a hipótese de que a condição de aquisição SAR em múltipla passagem e revisita única por radargrametria permitiu elaborar Modelos Digitais de Superfície de menor erro vertical, quando comparados àqueles produzidos em mesma condição de aquisição para a abordagem por interferometria. Além disso, o erro vertical dos MDSs variou com o tipo de ambiente costeiro analisado.

A série de 15 anos (2000 a 2014) de dados MODIS da Zona Costeira Amazônica mostrou que essa porção da costa norte é extremamente dinâmica com uma acresção total de 5.582,18 km² sob uma taxa de 372,15 km².ano⁻¹ e uma erosão total de 5.475,90 km² sob uma taxa de 365,06 km².ano⁻¹. O balanço sedimentar foi positivo em 106,27 km², com uma taxa de 7,08 km².ano⁻¹, indicando uma condição de deposição sedimentar. O setor costeiro Insular Estuarino foi o mais dinâmico para variações de linha de costa, com mudanças costeiras médias de 213,17±56,46 km² e balanço sedimentar médio de 20,65±73,59 km². De fato, nos últimos 9 anos (2006 a 2014), observou-se que a tendência das variações de linha de costa passa a ter um comportamento erosivo com balanço sedimentar de -36,11 km².ano⁻¹, o que torna bastante preocupante para faixa litorânea de até 10 km mais suscetíveis a inundações e processos erosivos por ação do período chuvoso e marés elevadas.

Os dados SAR CSK e TSX alcançaram desempenho satisfatório para prover mapas morfológicos na ZCA, em modo Stripmap de 3 metros de resolução espacial, incidências entre 22° a 59°, estes sob condições adversas de amplitude de maré entre 0 a 3 m e chuvas entre 0 a 60,8 mm.dia⁻¹. Da mesma forma, foram discriminados os ambientes costeiros amazônicos por meio de informação de coeficiente de retroespalhamento, coeficiente de variação e textura em regras hierárquicas aliadas a padrão, contexto e vizinhança de classificador orientado a objetos.

Os ambientes costeiros descritos por meio coeficiente de retroespalhamento e coerência compartilham muita ambiguidade e combinado com uma dispersão relativa elevada, como em pior caso notado na Planície Costeira, tornam o processo de mapeamento morfológico, baseados somente no sinal em amplitude, difícil de obter separabilidade e alta coerência. O Planalto Costeiro e o Terraço Fluviomarinho mostraram-se mais discrimináveis para o coeficiente de retroespalhamento. As informações derivadas de coeficiente de variação, textura e coerência mostraram-se fundamentais para o mapeamento dos ambientes costeiros, resultando em coeficientes *Kappa* entre 0,46 a 0,51.

O mapeamento dos ambientes costeiros amazônicos indicou que a geometria de aquisição por ângulos de incidência íngremes ($\theta < 35^\circ$) são mais relevantes para definir o nível de inundação ou linha de costa, especificamente no período chuvoso, enquanto que a geometria de aquisição por ângulos de incidência rasantes ($\theta \geq 35^\circ$), mostraram-se adequadas ao conhecimento da diversidade dos ambientes costeiros amazônicos, especificamente no período seco.

Os MDSs interferométricos resultaram em um erro vertical, em termos de RMSE entre 9,57 a 25,18 m, sendo que o melhor desempenho foi observado para dados do MDS CSK obtidos com ângulo de incidência íngreme, no período chuvoso compatível para a escala cartográfica de 1:50.000 classe de mapa A, entretanto, não houve compatibilidade em áreas de baixa coerência o que produziu diversas falhas de continuidade e buracos, com reconstrução tridimensional da superfície apenas em porções do Planalto Costeiro e Terraço Fluvioamarinho e prejuízo da Planície Costeira de comportamento incoerente.

O MDSs radargramétricos resultaram em RMSE entre 4,34 a 7,76 m, sendo que os melhores desempenhos ocorreram para os MDSs provenientes dos modelos de Toutin, com os dados CSK e TSX, estes compatíveis à escala cartográfica de 1:50.000 classe de mapa A. A principal vantagem foi a geração de MDSs contínuos e regulares, incluindo a Planície Costeira de comportamento incoerente.

A acurácia vertical dos ambientes costeiros amazônicos indicou o menor RMSE para o Tabuleiro Costeiro, com 3,89 a 28,59 m e o Terraço Fluvioamarinho com 3,79 a 20,33 m, ao se considerar as abordagens por interferometria ou radargrametria. Controversamente, ao menor RMSE, o ambiente costeiro de maior erro vertical foi a Planície Costeira com RMSE entre 4,16 a 26,24 m. Observa-se que o Tabuleiro Costeiro foi o ambiente costeiro mais adequado para as estimativas de altura na abordagem interferométrica e radargramétrica, ao se considerar a concordância dos parâmetros estatísticos providos pelos diagramas de Taylor e Alvo com posições próximas as referências levantadas em campo, ou seja, as reconstruções de superfície corresponderam no ajuste para a variabilidade e na magnitude do conjunto medido de altura.

Os conjuntos de dados SAR CSK e TSX e os métodos interferométricos e radargramétricos propiciaram mapear os ambientes costeiros amazônicos, face a perspectiva da banda X, alta resolução e revisita, incidência íngreme a rasante e um conjunto mínimo amostral de SGCP e ICP. Estes demonstraram suficiente suporte para mapear a topografia da ZCA, em nível detalhado de escala espacial (1:50.000) e frequente atualização (semestral a anual).

6.2 Recomendações

Novas iniciativas na ZCA devem considerar melhorar as técnicas de mapeamento de linha de costa, ao unir os dados ópticos e radar de abertura sintética em modo ScanSAR, para abordagem regionais e continentais, além de levar em conta a compartimentação geomorfológica da costa norte, relacionado às variáveis auxiliares meteo-oceanográficas para explicar as ocorrências e magnitudes de acreção e erosão.

O levantamento de campo deve contemplar ambientes em porções homogêneas sem interferência, com pelo menos 3 vezes maior do que o valor do pixel amostrado no terreno para o produto cartográfico final. Em adição, deve ser observado o azimute da linha de visada da plataforma que esteja em visibilidade livre ao terreno para dossel florestal e objetos não topográficos. Deve-se amostrar ambientes vegetados utilizando um polo de antena compatível com a altura do dossel. Os resíduos devem ser analisados afim de obter normalidade, *outliers* e ausência de viés como requisito anterior a definição dos ICPs. É recomendável proceder as primeiras análises estatísticas a partir de um MDS prévio, obtido por técnica similar e mesma faixa espectral.

As novas questões relacionadas a acurácia posicional devem explorar a planimetria, empregando refletores de canto e considerando a propagação do erro advindo das plataformas SAR em função da determinação de órbita, modelos de correção geométrica, sincronismo e referencial terrestre.

Os próximos estudos de interferometria SAR na ZCA devem prever a utilização de aquisições SAR multitemporais ($N > 30$), multicanais (X, C, L e P) e polarimétrica (HH, HV, VH e VV), baseadas nos métodos por espalhadores persistentes e distribuídos. Estes métodos de interferometria podem suportar mapeamentos de alta precisão (submétrico a centimétrico), em ambientes de comportamento incoerente, por meio da decomposição dos contribuintes da fase interferométrica e pela modelagem do efeito *speckle*.

As novas iniciativas de reconstrução tridimensional por radargrametria devem prever a modelagem de artefatos não topográficos (artificiais e naturais), tipo de relevo, boa distribuição espacial (planimétrica e altimétrica), filtragem *speckle*, tomadas de visada oposta e correspondência epipolar em voxel ao nível de subpartes. Em adição, a geometria de aquisição SAR precisa minorar a dependência por SGCP em favorecimento dos sistemas de determinação de órbita e referencial terrestre, e assim, resolve-se de maneira direta o refinamento e a conversão em alturas absolutas.

REFERÊNCIAS

- AIRBUS. **Elevation30 - Products**. Disponível em: <<http://www.intelligence-airbusds.com/en/6073-elevation30-products.php#spotdemprecision>>. Acesso em: 16 nov. 2016.
- ANTHONY, E. J. et al. The Amazon-influenced muddy coast of South America: A review of mud-bank–shoreline interactions. **Earth-Science Reviews**, v. 103, n. 3–4, p. 99–121, dez. 2010.
- ANTONOVA, S. et al. Spatio-temporal variability of X-band radar backscatter and coherence over the Lena River Delta, Siberia. **Remote Sensing of Environment**, v. 182, p. 169–191, set. 2016.
- ARNESEN, A. S. et al. Monitoring flood extent in the lower Amazon River floodplain using ALOS/PALSAR ScanSAR images. **Remote Sensing of Environment**, v. 130, p. 51–61, mar. 2013.
- ASI, (ITALIAN SPACE AGENCY). **Calls and opportunities**. Disponível em: <<http://www.asi.it/en/agency/calls-and-opportunities>>. Acesso em: 15 jan. 2016a.
- ASI, (ITALIAN SPACE AGENCY). **COSMO-SkyMed Mission and Products Description**. Rome: Italian Space Agency, 2016b. Disponível em: <http://www.asi.it/sites/default/files/attach/bandi/cosmo-skymed_mission_and_products_description_update_2_1.pdf>.
- ASPRS, (AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING). ASPRS accuracy standards for large-scale maps. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 56, n. 7, p. 1068–1070, 1990.
- ASPRS, (AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING). ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 81, n. 3, p. 1–26, 1 mar. 2015.
- ASPRS, (AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING); ASCE, (AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS). **Glossary of the Mapping Sciences**. New York: Bethesda Maryland and ASCE, 1994.
- AZEVEDO, G. P. C. DE; CAMARÃO, A. P.; MESQUITA, T. DA C. **Características dos sistemas de produção pecuários dos municípios de Soure, Salvaterra e Cachoeira do Arari, Ilha de Marajó – Pará**. Belém: [s.n.].
- BAATZ, M.; SCHÄPE, A. **Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation**. Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. **Anais...2000**
- BALZ, T.; ZHANG, L.; LIAO, M. Direct stereo radargrammetric processing using massively parallel processing. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 79, p. 137–146, maio 2013.
- BAMLER, R. Interferometric stereo radargrammetry: absolute height\ndetermination from ERS-ENVISAT interferograms. **IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No.00CH37120)**, v. 2, 2000.
- BAMLER, R.; HARTL, P. Synthetic aperture radar interferometry. **Inverse Problems**, v. 14,

n. 4, p. 55, 1998.

BATISTA, E. . M.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; SILVEIRA, O. . F. M. **Monitoramento da linha de costa do Parque Nacional do Cabo Orange através da análise multi-temporal de imagens de sensores remotos**. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais...Florianópolis: INPE, 2007Disponível em:

<<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.22.25.58/doc/6621-6628.pdf>>

BATISTA, E. DAS M.; SOUZA FILHO, P. W. M. E; SILVEIRA, O. F. M. DA. Avaliação de áreas deposicionais e erosivas em cabos lamosos da zona costeira Amazônica através da análise multitemporal de imagens de sensores remotos. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. 1, p. 83–96, 2009.

BEMERGUY, R. L. **Morfotectônica e evolução paleogeográfica da região da calha do Rio Amazonas**. [s.l.] Universidade Federal do Pará, 1997.

BERARDINO, P. et al. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. v. 40, n. 11, p. 2375–2383, 2002.

BETBEDER, J. et al. TerraSAR-X dual-pol time-series for mapping of wetland vegetation. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 107, p. 90–98, 2015.

BLASCHKE, T. Object based image analysis for remote sensing. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 65, n. 1, p. 2–16, jan. 2010.

BRASIL. Decreto Federal n.º 89.817, de 20 de junho de 1984. . 1984.

BRAUTIGAM, B. et al. **TanDEM-X global DEM quality status and acquisition completion**. 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Anais...IEEE, jul. 2014Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6947208>>

CAPALDO, P. et al. High-Resolution SAR Radargrammetry: A First Application With COSMO-SkyMed SpotLight Imagery. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 8, n. 6, p. 1100–1104, nov. 2011.

CAPALDO, P. **High resolution radargrammetry with COSMO-SkyMed, TerraSAR-X and RADARSAT-2 imagery: development and implementation of an image orientation model for Digital Surface Model generation**. [s.l.] Università di Roma, 2013.

CAPALDO, P. et al. Evaluation and comparison of different radargrammetric approaches for Digital Surface Models generation from COSMO-SkyMed, TerraSAR-X, RADARSAT-2 imagery: Analysis of Beauport (Canada) test site. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 100, p. 60–70, fev. 2015.

CCRS, (CANADA CENTER FOR REMOTE SENSING). **Fundamentals of Remote Sensing. A Canada Centre for Remote Sensing Tutorial**. [s.l.: s.n.].

CENSIPAM, (CENTRO GESTOR E OPERACIONAL DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DA AMAZÔNIA). **Projeto Cartografia da Amazônia**. Disponível em:

<<http://www.sipam.gov.br/assuntos/cartografia>>. Acesso em: 22 dez. 2016.

COLESANTI, C. et al. Sar monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 7, p. 1685–1701, jul. 2003.

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data:**

- principles and practices**. New York: CRC Press/Taylor & Francis, 2009.
- COSTA, J. B. S. et al. Neotectônica Da Região Amazônica : Aspectos Tectônicos , Geomorfológicos E Depositionais. **Geonomos**, v. 4, n. 2, p. 23–44, 1996.
- COSTA, J. B. S. et al. Tectonics and paleogeography of the Marajo Basin, northern Brazil. **Anais Da Academia Brasileira De Ciencias**, v. 74, n. 3, p. 519–531, 2002.
- COUGO, M. et al. Radarsat-2 Backscattering for the Modeling of Biophysical Parameters of Regenerating Mangrove Forests. **Remote Sensing**, v. 7, n. 12, p. 17097–17112, 2015.
- COVENEY, S. et al. Dual-scale validation of a medium-resolution coastal DEM with terrestrial LiDAR DSM and GPS. **Computers & Geosciences**, v. 36, n. 4, p. 489–499, abr. 2010.
- CROSETTO, M. et al. Persistent Scatterer Interferometry: A review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 115, p. 78–89, maio 2016.
- CROSETTO, M.; PÉREZ, F. Radargrammetry and SAR interferometry for DEM generation : validation and data fusion. **SAR Workshop: CEOS Committee on Earth Observation Satellites**, n. 1, p. 367–372, 2000.
- DE ANDRADE, M. M. N. et al. A socioeconomic and natural vulnerability index for oil spills in an Amazonian harbor: a case study using GIS and remote sensing. **Journal of environmental management**, v. 91, n. 10, p. 1972–80, out. 2010.
- DE OLIVEIRA, C. G. **AVALIAÇÃO DA INFORMAÇÃO PLANIALTIMÉTRICA DERIVADA DE DADOS RADARSAT-2 E TERRASAR-X PARA PRODUÇÃO DE CARTAS TOPOGRÁFICAS NA ESCALA 1:50.000**. [s.l.] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2011.
- DE OLIVEIRA, C. G.; PARADELLA, W. R.; DA SILVA, A. DE Q. Assessment of radargrammetric DSMs from TerraSAR-X Stripmap images in a mountainous relief area of the Amazon region. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 66, n. 1, p. 67–72, jan. 2011.
- DEOS. **Delft object-oriented radar interferometric software: Users manual and technical documentation**Delft University of Technology, Delft. Netherlands: [s.n.].
- DEVILLERS, R. ; JEANSOULIN, R. . **Fundamentals of Spatial Data Quality**. [s.l: s.n.].
- DHN, (DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO). **PREVISÕES DE MARÉS**. Disponível em: <<http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-previsao-mare/tabuas/>>. Acesso em: 30 abr. 2016.
- DLR, (GERMAN AEROSPACE CENTER). **Basic Product Specification Document**. Cologne: German Aerospace Centre, 2013. Disponível em: <<http://sss.terrasar-x.dlr.de/>>.
- DLR, (GERMAN AEROSPACE CENTER). **New 3D world map – TanDEM-X global elevation model completed**. Disponível em: <http://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10081/151_read-19509/year-all/#/gallery/24516>. Acesso em: 15 nov. 2016a.
- DLR, (GERMAN AEROSPACE CENTER). **TerraSAR-X Science Service System**. Disponível em: <<http://sss.terrasar-x.dlr.de/>>. Acesso em: 20 jan. 2016b.
- DSG, (DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO). **Especificação Técnica para a**

Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais. Brasília: [s.n.]. Disponível em:

<<http://www.geoportal.eb.mil.br/index.php/inde2?id=140/>>.

EL-ROBRINI, M. et al. Atlas de erosão e progradação da zona costeira do Estado do Pará – Região Amazônica: Áreas oceânica e estuarina. In: MUEHE, D. (Ed.). . **Atlas de Erosão e Progradação da Zona Costeira Brasileira.** São Paulo: [s.n.]. p. 1–34.

ESA, (EUROPEAN SPACE AGENCY). **The SENTINEL-1 Toolbox (S1TBX).** Disponível em: <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1>>. Acesso em: 3 jul. 2014.

ESA, (EUROPEAN SPACE AGENCY). **Sentinel-1 Toolbox TOPS Interferometry Tutorial.** [s.l: s.n.].

EVANS, T. L.; COSTA, M. Landcover classification of the Lower Nhecolândia subregion of the Brazilian Pantanal Wetlands using ALOS/PALSAR, RADARSAT-2 and ENVISAT/ASAR imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 128, p. 118–137, jan. 2013.

FARR, T. G. et al. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, p. RG2004, 19 maio 2007.

FAYARD, F.; MERIC, S.; POTTIER, E. **Matching stereoscopic SAR images for radargrammetric applications.** 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. **Anais...IEEE**, 2007Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4423819>>. Acesso em: 10 ago. 2016

FERRAIOLI, G. et al. Multichannel phase unwrapping with graph cuts. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 6, n. 3, p. 562–566, 2009.

FERRAIUOLO, G. et al. DEM reconstruction accuracy in multichannel SAR interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, n. 1, p. 191–201, 2009.

FERRETTI, A. et al. **InSAR Principles-Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation.** Noordwijk: ESA Publications, 2007.

FERRETTI, A. et al. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, n. 9, p. 3460–3470, 2011.

FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. Multibaseline InSAR DEM Reconstruction: The Wavelet Approach. **IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING**, v. 37, n. 2, 1999.

FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. v. 39, n. 1, p. 8–20, 2001.

FGDC. Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3 : National Standard for Spatial Data Accuracy. **World**, p. 28, 1998.

FILHO, P. W. M. S. et al. Environmental sensitivity index (ESI) mapping of oil spill in the amazon coastal zone: The PIATAM Mar project. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. SUPPL. 1, p. 7–22, 2009.

FRANÇA, C. F. **Morfologia e Mudanças Costeiras da Margem Leste da Ilha de Marajó (PA).** Belém: Universidade Federal do Pará, 2003.

FRANÇA, C. F.; SOUZA-FILHO, P. W. Análise das mudanças morfológicas costeiras de médio período na margem leste da ilha de Marajó (PA) em imagem landsat. **Revista**

Brasileira de Geociências, v. 33, p. 127–136, 2003.

FRANÇA, C. F. DE; SOUZA FILHO, P. W. M. Compartimentação morfológica da margem leste da ilha de marajó: zona costeira dos municípios de soure e salvaterra – Estado do Pará. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 1, n. 7, p. 33–42, 2006.

FRANÇA, C. F. DE; SOUZA FILHO, P. W. M. E; EL-ROBRINI, M. **Análise faciológica e estratigráfica da planície costeira de Soure (margem leste da ilha de Marajó-PA), no trecho compreendido entre o canal do Cajuúna e o estuário Paracauari** *Acta Amazonica*, 2007.

FURTADO, L. F. DE A.; SILVA, T. S. F.; NOVO, E. M. L. DE M. Dual-season and full-polarimetric C band SAR assessment for vegetation mapping in the Amazon várzea wetlands. **Remote Sensing of Environment**, v. 174, p. 212–222, mar. 2016.

GALO, M.; CAMARGO, P. Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. **Congresso Brasileiro De Cadastro ...**, n. 1, p. 41–48, 1994.

GAMA, F. F. **ESTUDO DA INTERFEROMETRIA E POLARIMETRIA SAR EM POVOAMENTOS FLORESTAIS DE EUCALYPTUS sp.** [s.l.] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007.

GENS, R.; VANGENDEREN, J. L. SAR interferometry - Issues, techniques, applications. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 10, p. 1803–1835, 1996.

GENSAC, E. et al. Seasonal and inter-annual dynamics of suspended sediment at the mouth of the Amazon river: The role of continental and oceanic forcing, and implications for coastal geomorphology and mud bank formation. **Continental Shelf Research**, v. 118, p. 49–62, abr. 2016.

GEYER, R. W. et al. Physical oceanography of the Amazon shelf. **Continental Shelf Research**, v. 16, n. 5–6, p. 575–616, jan. 1996.

GOBLIRSCH, W.; PASQUALI, P. Algorithms for Calculation of Digital Surface Models from the Unwrapped Interferometric Phase. **Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'96)**, p. 656–658, 1996.

GONZALEZ, L. et al. A sub km resolution global database of surface reflectance and emissivity based on 10-years of MODIS data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 122, p. 222–235, 2016.

GONZALEZ, R. C. .; WOODS, R. E. **Digital Image Processing**. [s.l.] Prantice Hall, 2010. v. 39

GRAHAM, L. C. Synthetic Interferometer Radar For Topographic Mapping. **Proceedings of the IEEE**, v. 62, n. 6, p. 763–768, 1974.

GUIMARÃES, J. T. F. **GEOMORFOLOGIA, MUDANÇAS NA FONTE DE MATÉRIA ORGÂNICA E VEGETAÇÃO EM PLANÍCIES DE MARÉ PRÓXIMAS A FOZ DO RIO AMAZONAS DURANTE O HOLOCENO**. [s.l.] Universidade Federal do Pará, 2011a.

GUIMARAES, U. S. et al. **Change detection applied on shorelines in the mouth of Amazon River**. 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. **Anais...Quebec City: IEEE**, jul. 2014Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6946891>>

GUIMARÃES, U. S. **ANÁLISE INTEGRADA DA PAISAGEM PARA AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À PERDA DE SOLO DAS MARGENS DA BAÍA DE MARAJÓ, ESTADO DO PARÁ.** [s.l.] Universidade Federal do Pará, 2011b.

GUTJAHR, K. et al. The Epipolarity Constraint in Stereo-Radargrammetric DEM Generation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 8, p. 5014–5022, ago. 2014.

HAKLAY, M. How Good is Volunteered Geographical Information? A Comparative Study of OpenStreetMap and Ordnance Survey Datasets. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 37, n. 4, p. 682–703, ago. 2010.

HALL-ATKINSON, C.; SMITH, L. C. Delineation of delta ecozones using interferometric SAR phase coherence Mackenzie River Delta, N.W.T., Canada. **Remote Sensing of Environment**, v. 78, n. 3, p. 229–238, 2001.

HANSEN, R. F. **RADAR INTERFEROMETRY Data Interpretation and Error Analysis.** [s.l: s.n.]. v. 2

HE, X. et al. **Stereo Radargrammetry in South-East Asia using TerraSAR-X.** (W. Wagner, B. Székely, Eds.) ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS. **Anais...** Viena, Austria: 2010

HELLWICH, O. **Basic Principles and Current Issues of SAR Interferometry.** ISPRS Workshop, Commission I, Working Group I/3. **Anais...** Munich: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Inc. (ISPRS), 1999

HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. **Principles and applications of imaging radar. Manual of remote sensing, volume 2.** [s.l: s.n.]. v. 2

HEROLD, N. D.; HAACK, B. N.; SOLOMON, E. An evaluation of radar texture for land use/cover extraction in varied landscapes. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 5, n. 2, p. 113–128, maio 2004.

HO TONG MINH, D. et al. SAR tomography for the retrieval of forest biomass and height: Cross-validation at two tropical forest sites in French Guiana. **Remote Sensing of Environment**, v. 175, p. 138–147, 2016.

HOOPER, A. et al. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. v. 31, n. December, p. 1–5, 2004.

HUSSAIN, M. et al. Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 80, p. 91–106, jun. 2013.

IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira.** [s.l: s.n.].

IBGE, (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Censo Demográfico 2010.** Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/>>. Acesso em: 20 abr. 2015.

IBGE, (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Downloads - Geociências.** Disponível em: <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>. Acesso em: 25 abr. 2015.

INMET, (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA). **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa.** Disponível em:

- <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 6 abr. 2016.
- IPCC. Summary for Policymakers. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (Ed.). . **Climate Change 2013 - The Physical Science Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. p. 1–30.
- JAXA, (JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY). **Precise Global Digital 3D Map “ALOS World 3D” Homepage**. Disponível em: <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d/index_e.htm>. Acesso em: 15 nov. 2016.
- JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: an earth resource perspective**. [s.l: s.n.]. v. 1
- JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. [s.l: s.n.]. v. 47
- JOLLIFF, J. K. et al. Summary diagrams for coupled hydrodynamic-ecosystem model skill assessment. **Journal of Marine Systems**, v. 76, n. 1–2, p. 64–82, fev. 2009.
- JOSHI, C. et al. Remotely sensed estimation of forest canopy density: A comparison of the performance of four methods. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 8, n. 2, p. 84–95, jun. 2006.
- JUSTICE, C. . et al. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1–2, p. 3–15, nov. 2002.
- KAMPES, B. M. **Radar interferometry: Persistent scatterer technique**. [s.l: s.n.]. v. 12
- KASISCHKE, E. S.; MELACK, J. M.; CRAIG DOBSON, M. The use of imaging radars for ecological applications—A review. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n. 2, p. 141–156, fev. 1997.
- KIM, S. et al. Interferometric Coherence Analysis of the EvergladesWetlands, South Florida. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 51, n. 12, p. 5210–5224, 2013.
- KJERFVE, B. et al. Chapter Twenty Morphodynamics of muddy environments along the Atlantic coasts of North and South America. In: **Proceedings in Marine Science**. [s.l: s.n.]. v. 4p. 479–532.
- KOYAMA, C. N. et al. Disaster debris estimation using high-resolution polarimetric stereo-SAR. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 120, p. 84–98, 2016.
- KUMAR, T.; PATNAIK, C. Discrimination of mangrove forests and characterization of adjoining land cover classes using temporal C-band Synthetic Aperture Radar data: A case study of Sundarbans. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 23, p. 119–131, ago. 2013.
- LEBERL, F. W. **Radargrammetric Image Processing**. Norwood MA: Artech House, 1990.
- LEBERL, F. W. Radargrammetry. In: HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. (Eds.). . **Principles & Applications of Imaging Radar, Manual of Remote Sensing, 3rd. Ed.** 3. ed. [s.l.] John Wiley and Sons, 1998. p. 183–269.
- LEE, J.-S.; POTTIER, E. **Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications**. [s.l.] CRC Press, 2009.
- LI, Z.; ZHU, C.; GOLD, C. **Digital Terrain Modeling**. [s.l.] CRC Press, 2004.

- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. [s.l: s.n.]. v. 4rd
- LP DAAC, (LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER). **Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500m**. Disponível em: <lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod09a1>. Acesso em: 3 jun. 2015a.
- LP DAAC, (LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER). **MODIS Reprojection Tool**Sioux FallsLand Processes DAAC USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, , 2015b. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/tools/modis_reprojection_tool>
- LU, D. et al. Change detection techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 12, p. 2365–2401, jun. 2004.
- MADSEN, S. N.; MARTIN, J. M.; ZEBKER, H. A. Analysis and Evaluation of the NASA/JPL TOPSAR Across-Track Interferometric SAR System. **System**, v. 33, n. 2, p. 383–391, 1995.
- MADSEN, S. N.; ZEBCKER, H. A. Imaging radar interferometry. In: HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. (Eds.). . **Principles & Applications of Imaging Radar, Manual of Remote Sensing, 3rd. Ed.** 3. ed. [s.l.] John Wiley and Sons, 1998. p. 359–380.
- MAGUIRE, D. J.; BATTY, M.; GOODCHILD, M. F. **GIS, spatial analysis, and modeling**. Redlands: Esri Press, 2005.
- MARENGO, J. A. et al. The Drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, v. 21, n. 3, p. 495–516, fev. 2008.
- MARTORANO, L. G. **Estudos climáticos do estado do Pará, classificação climática (Koppen) e deficiência hídrica (Thornthwaite, Mather)**. [s.l: s.n.].
- MEADE, R. H. et al. Storage and Remobilization of Suspended Sediment in the Lower Amazon River of Brazil. **Science**, v. 228, n. 4698, p. 488–490, 26 abr. 1985.
- MENDES, A. C. Geomorfologia e sedimentologia. In: FERNANDES, M. E. B. (Ed.). . **Os manguezais da costa norte brasileira**. Belém: Fundação Rio Bacanga, 2003. p. 165.
- MERIC, S.; FAYARD, F.; POTTIER, É. A Multiwindow Approach for Radargrammetric Improvements. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, n. 10, p. 3803–3810, out. 2011.
- MÉRIC, S.; FAYARD, F.; POTTIER, É. Radargrammetric SAR image processing. In: **Geoscience and remote sensing**. Rijeka, Croatia: INTECH Open Access Publisher, 2009. p. 421–454.
- MITCHELL, A. L. et al. C- and L-band SAR interoperability: Filling the gaps in continuous forest cover mapping in Tasmania. **Remote Sensing of Environment**, v. 155, p. 58–68, dez. 2014.
- MUEHE, D. Aspectos gerais da erosão costeira no brasil. **Mercator**, v. 4, n. 7, p. 97–110, 2005.
- MUEHE, D. O litoral Brasileiro e sua compartimentação. In: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (Eds.). . **Geomorfologia do Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil S. A., 2006. p. 273–349.

- MUKHERJEE, S. et al. Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 21, p. 205–217, abr. 2013.
- MURA, J. C. **Geocodificação Automática De Imagens De Radar De Abertura Sintética Interferométrico : Sistema Geo-InSAR**. [s.l.] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.
- NAPIERALSKI, J. et al. Remote Sensing and GIScience in Geomorphological Mapping. In: **Treatise on Geomorphology**. [s.l.: s.n.]. v. 3p. 187–227.
- NARVAES, I. DA S.; SANTOS, J. R. DOS; SILVA, A. DE Q. DA. Analysis of structural parameters of forest typologies USING L-band SAR data. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 16, n. 3, p. 475–489, 2010.
- NASCIMENTO, W. R. et al. Mapping changes in the largest continuous Amazonian mangrove belt using object-based classification of multisensor satellite imagery. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 117, p. 83–93, jan. 2013.
- NITTI, D. O. et al. Impact of DEM-Assisted Coregistration on High-Resolution SAR Interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, n. 3, p. 1127–1143, mar. 2011.
- NITTROUER, C. A. et al. The deltaic nature of Amazon shelf sedimentation. **Geological Society of America Bulletin**, v. 97, n. 4, p. 444–458, 1986.
- NITTROUER, C. A. et al. An introduction to the geological significance of sediment transport and accumulation on the Amazon continental shelf. **Marine Geology**, v. 125, n. 3–4, p. 177–192, jul. 1995.
- O’LOUGHLIN, F. E. et al. A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product. **Remote Sensing of Environment**, v. 182, p. 49–59, set. 2016.
- OLIVEIRA, C. G. et al. An assessment of the use of RADARSAT-2 for detailed topographic mapping in a tropical semiarid terrain of Brazil. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 37, n. 5, p. 472–483, 13 jan. 2012.
- OSMANOĞLU, B. et al. Time series analysis of InSAR data: Methods and trends. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 115, p. 90–102, maio 2016.
- OSMANOĞLU, B.; DIXON, T. H.; WADOWINSKI, S. Three-Dimensional Phase Unwrapping for Satellite. v. 52, n. 2, p. 1059–1075, 2014.
- OUCHI, K. **Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics** **Remote Sensing**, 2013.
- PARÁ RURAL, (PARÁ RURAL). **Zoneamento-Ecológico Econômico das zonas Lestes e Calha Norte do Estado do Pará: diagnóstico do meio físico-biótico**. Belém: [s.n.].
- PARADELLA, W. R. et al. Produção de carta topográfica através da estereoscopia de alta resolução do RADARSAT-1 integrada com dados TM-LANDSAT 5: uma avaliação para terrenos planos na Floresta Nacional de Tapajós (PA). **Brazilian Journal of Geology**, v. 33, n. 2, p. 99–110, 2003.
- PARADELLA, W. R. et al. Geração de Carta Topográfica com Estéreo-pares Fine do RADARSAT-1 e dados ETM+ Landsat 7 em Ambiente Montanhoso na Região Amazônica (Serra dos Carajás, Pará). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34, n. 3, p. 323–332, 2005a.

- PARADELLA, W. R. et al. Operational use of RADARSAT-1 fine stereoscopy integrated with Landsat-5 thematic mapper data for cartographic application in the Brazilian Amazon. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 2, p. 139–148, 2 jan. 2005b.
- PARADELLA, W. R. et al. Effect of microtopography on RADARSAT-1 and PALSAR backscattering from rock alteration products in the Curaçá Valley, Brazil. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 35, n. 3, p. 262–269, 2009.
- PARADELLA, W. R. et al. Radar interferometry in surface deformation detection with orbital data. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 64, n. 4, p. 797–811, 2012.
- PARADELLA, W. R. et al. Mapping surface deformation in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon Region) using an integrated SAR analysis. **Engineering Geology**, v. 193, p. 61–78, 2015.
- PASQUALI, P. et al. **SARscape®, a Commercial-Off-The-Shelf Software Package for the Measurement, Monitoring and Modeling of Geophysical Phenomena**. 23 set. 2012Disponível em: <<http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=62677>>
- PCI GEOMATICS. **PCI Geomatics - Geomatica Help**OntarioPCI Geomatics, , 2016. Disponível em: <www.pcigeomatics.com>
- PEREIRA, E. A. DE S. et al. Generation and evaluation of radargrammetric DEM from RADARSAT-1 standard images in low relief area in the Amazon coastal plain. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 32, n. 3, p. 405–418, 2014a.
- PEREIRA, L. C. C. et al. Seasonal changes in oceanographic processes at an equatorial macrotidal beach in northern Brazil. **Continental Shelf Research**, v. 43, p. 95–106, jul. 2012.
- PEREIRA, L. C. C. et al. Managing physical and anthropogenic hazards on macrotidal Amazon beaches. **Ocean and Coastal Management**, v. 96, p. 49–162, 2014b.
- PEREIRA, T. Á. J.; NERO, M. A. **Análise de Normas de Controle De Qualidade Posicional em Cartografia ao Redor do Mundo: Exemplos Atuais de Alguns Países**. IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. **Anais...Recife: 2012**
- PERKO, R. et al. Forest Assessment Using High Resolution SAR Data in X-Band. **Remote Sensing**, v. 3, n. 12, p. 792–815, 13 abr. 2011.
- POLIDORI, L. **Cartographie radar**. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 1997.
- POLIDORIO, A. M.; IMAI, N. N.; TOMMASELLI, A. M. G. **Índice Indicador De Corpos D'Água Para Imagens Multiespectrais**. I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. **Anais...Recife: 2004**
- QI, Z. et al. A three-component method for timely detection of land cover changes using polarimetric SAR images. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 107, p. 3–21, set. 2015.
- RAGGAM, H. et al. Assessment of the Stereo-Radargrammetric Mapping Potential of TerraSAR-X Multibeam Spotlight Data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 48, n. 2, p. 971–977, fev. 2010.
- REBELO, L.-M. Eco-Hydrological Characterization of Inland Wetlands in Africa Using L-

Band SAR. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 3, n. 4, p. 554–559, dez. 2010.

REIGBER, C. et al. **Impact of precise orbits on SAR interferometry**. ERS SAR interferometry, Proceedings of the Fringe 96 Workshop. **Anais...**Zurich: European Space Agency, 1996

REJAUR RAHMAN, M.; SAHA, S. K. Multi-resolution segmentation for object-based classification and accuracy assessment of land use/land cover classification using remotely sensed data. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 36, n. 2, p. 189–201, 2008.

RESCHKE, J. et al. Capability of C-Band SAR for Operational Wetland Monitoring at High Latitudes. **Remote Sensing**, v. 4, n. 12, p. 2923–2943, 1 out. 2012.

RICHARDS, J. A. Remote Sensing with Imaging Radar. **Media**, p. 361, 2009.

RICHARDS, J. A.; JIA, X. **Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction**. New York: Springer, 2006. v. 46

RODRIGUES, S. W. P.; SOUZA-FILHO, P. W. M. Mapping of environmental sensitivity index to oil spill from Landsat TM images: “A study case on the Amazon coastal plain”. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 30, n. 4, p. 533–543, 2012.

RODRÍGUEZ, E.; MORRIS, C. S.; BELZ, J. E. A Global Assessment of the SRTM Performance. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 3, p. 249–260, 1 mar. 2006.

ROSSETTI, D. D. F.; GÓES, A. M. **O Neógeno da Amazônia Oriental**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2004.

RUIZ-ARMENTEROS, A. M. et al. Multi-Temporal InSAR Processing Comparison in Presence of High Topography. **Procedia Computer Science**, v. 100, p. 1181–1190, 2016.

SANTOS, V. F. **Ambientes Costeiros Amazônicos: Avaliação de Modificações Ambientais por Sensoriamento Remoto**. Niteroi: Universidade Federal Fluminense, 2006.

SARMAP. **SARscape - Online Help**PurascaSARMAP, , 2016a. Disponível em: <<http://www.sarmap.ch/>>

SARMAP. **SARscape ’ s Basic module Tutorial**. [s.l: s.n.].

SCHMIDT, D. A.; BU, R. Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley , California , from a large interferometric synthetic aperture radar data set. v. 108, p. 1–13, 2003.

SCHREIER, G. **SAR Geocoding: Data and Systems**. Karlsruhe: Wichmann, 1993.

SCHUBERT, A. et al. Accuracy After Compensation for Earth-System Effects. p. 3301–3304, 2012.

SHANNON, C. E. Editorial note on “Communication in the presence of noise”. **Proceedings of the IEEE**, v. 72, n. 12, p. 1713–1713, 1984.

SOUZA-FILHO, P. W. M. et al. Zona Costeira Amazônica: O cenário regional e os indicadores bibliométricos em C&T. In: **Bibliografia da Zona Costeira Amazônica**. Belém: Museo Paraense Emílio Goeldi / Universidade Federal do Pará / Petrobras, 2005. p. 400.

- SOUZA-FILHO, P. W. M. et al. Discrimination of coastal wetland environments in the Amazon region based on multi-polarized L-band airborne Synthetic Aperture Radar imagery. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 95, n. 1, p. 88–98, nov. 2011.
- SOUZA FILHO, P. W. M.; FARIAS MARTINS, E. D. S.; DA COSTA, F. R. Using mangroves as a geological indicator of coastal changes in the Bragança macrotidal flat, Brazilian Amazon: A remote sensing data approach. **Ocean & Coastal Management**, v. 49, n. 7–8, p. 462–475, jan. 2006.
- SZABÓ, G.; SINGH, S. K.; SZABÓ, S. Slope angle and aspect as influencing factors on the accuracy of the SRTM and the ASTER GDEM databases. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 83–84, p. 137–145, 2015.
- SZLAFSTEIN, C. F. Indefinições e obstáculos no gerenciamento da Zona Costeira do Estado do Pará. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 9, n. 2, p. 47–58, 2009.
- TACHIKAWA, T. et al. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results. **NASA Land Processes Distributed Active Archive Center and Joint Japan-US ASTER Science Team**, p. 1–27, 2011.
- TAPAKIS, R.; CHARALAMBIDES, A. G. Equipment and methodologies for cloud detection and classification: A review. **Solar Energy**, v. 95, p. 392–430, set. 2013.
- TAYLOR, K. E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 106, n. D7, p. 7183–7192, 16 abr. 2001.
- TEIXEIRA, S. G. **Radar de abertura sintética aplicado ao mapeamento e reconhecimento de zonas úmidas costeiras**. Belém: Universidade Federal do Pará, 2011.
- TESSLER, M. G.; GOYA, S. C. Processos Costeiros Condicionantes do Litoral Brasileiro. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 17, n. 8, p. 11–23, 2005.
- TOMMASELLI, A. M. G. **Fotogrametria Básica**. Presidente Prudente: [s.n.].
- TOUTIN, T. Error tracking of radargrammetric DEM from RADARSAT images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 37, n. 5 pt 1, p. 2227–2238, 1999.
- TOUTIN, T. Evaluation of radargrammetric DEM from RADARSAT images in high relief areas. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 38, n. 2, p. 782–789, mar. 2000.
- TOUTIN, T. Impact of terrain slope and aspect on radargrammetric DEM accuracy. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 57, n. 3, p. 228–240, dez. 2002.
- TOUTIN, T. Path Processing and Block Adjustment With RADARSAT-1 SAR Images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 10, p. 2320–2328, out. 2003.
- TOUTIN, T. Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 10, p. 1893–1924, maio 2004.
- TOUTIN, T.; CHENIER, R. 3-D Radargrammetric Modeling of RADARSAT-2 Ultrafine Mode: Preliminary Results of the Geometric Calibration. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 6, n. 3, p. 611–615, jul. 2009.

- TOUTIN, T.; GRAY, L. **State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data** *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* Elsevier Science Publishers B.V., , 2000.
- TREBOSSSEN, H. et al. Monitoring coastal evolution and associated littoral hazards of French Guiana shoreline with radar images. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 337, n. 13, p. 1140–1153, 2005.
- TRIMBLE. **eCognition® Developer 8** München Trimble Germany GmbH, , 2014.
- ULABY, F. T.; MOORE, R. K.; FUNG, A. K. **Microwave Remote Sensing: Active and Passive Volume II: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory**. [s.l.: s.n.]. v. 2
- USGS, (UNITED STATES GEOLOGY SURVEY). **EarthExplorer - USGS**. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 5 abr. 2015a.
- USGS, (UNITED STATES GEOLOGY SURVEY). **Landsat Missions**. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/tools_wrs-2_shapefile.php>. Acesso em: 2 fev. 2015b.
- USGS, (UNITED STATES GEOLOGY SURVEY). **Elevation Products**. Disponível em: <<https://eros.usgs.gov/elevation-products>>. Acesso em: 10 out. 2016.
- VENTURIERI, A.; BACELAR, M. D. R. Mapeamento do Uso e Cobertura da Terra da Calha Norte e Leste do Estado do Pará do ZEE Zona Leste e Calha Norte. In: **Zoneamento Ecológico-Econômico da Zona Leste e Calha-Norte do Estado do Pará: Diagnóstico do Meio Físico-Biótico**. Belém: PARÁ RURAL, 2010. p. 103–122.
- VIEIRA, L. S.; SANTOS, W. H.; FALESI, I. C. **Levantamento de reconhecimento dos solos da Região Bragantina**. Belém: [s.n.].
- WANG, Y. **Remote sensing of coastal environments**. [s.l.] CRC Press/Taylor & Francis, 2010.
- WATRIN, O. D. S.; SANTOS, J. R.; VALÉRIO FILHO, M. **Análise da Dinâmica na Paisagem do Nordeste Paraense Através de Técnicas**. Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...** Salvador: INPE, 1996 Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/sid.inpe.br/deise/1999/01.27.16.24/doc/T55.pdf>>
- WEGMULLER, U. et al. **Ionospheric Electron Concentration Effects on SAR and INSAR**. 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing. **Anais...** IEEE, jul. 2006 Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4242104/>>
- WEGMÜLLER, U. et al. DEM generation using ERS-ENVISAT interferometry. **Journal of Applied Geophysics**, v. 69, n. 1, p. 51–58, set. 2009.
- WERMUTH, M. et al. TerraSAR-X precise orbit determination with real-time GPS ephemerides. **Advances in Space Research**, v. 50, n. 5, p. 549–559, set. 2012.
- WESSEL, B. et al. **Validation of the absolute height accuracy of TanDEM-X DEM for moderate terrain**. 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. **Anais...** IEEE, jul. 2014 Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6947209/>>
- WILSON, J. P. Digital terrain modeling. **Geomorphology**, v. 137, n. 1, p. 107–121, jan. 2012.
- WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. **Elements of Photogrammetry: with applications in GIS**. 3.

ed. New York: McGraw-Hill, 2000.

WOODHOUSE, I. H. **Introduction to Microwave Remote Sensing**. New York: CRC Press/Taylor & Francis, 2006.

XIE, C. et al. Long term detection of water depth changes of coastal wetlands in the Yellow River Delta based on distributed scatterer interferometry. **Remote Sensing of Environment**, v. 164, p. 238–253, 2015.

ZAMBONI, A.; NICOLODI, J. L. **Atlas do Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha do Brasil**. Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br/component/k2/item/7562?Itemid=866>>. Acesso em: 16 fev. 2016.

ZEBKER, H. A.; ROSEN, P. A.; HENSLEY, S. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 102, n. B4, p. 7547–7563, 10 abr. 1997.

ZEBKER, H. A.; VILLASENOR, J. Decorrelation in interferometric radar echoes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n. 5, p. 950–959, 1992.

ZHANG, X. et al. Fusion of space-borne multi-baseline and multi-frequency interferometric results based on extended Kalman filter to generate high quality DEMs. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 111, p. 32–44, 2016.