

Revista Brasileira de Cartografia (2015) N^o 67/3: 637-653
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

COMPARAÇÃO ENTRE OS PRINCIPAIS MODELOS PARA O RETROESPALHAMENTO SAR DA NEVE

Comparison of the Main Models for Snow SAR Backscatter

Jean Marcel de Almeida Espinoza¹, Jorge Arigony Neto^{1,2} & Ricardo Jaña³

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto

Av. Bento Gonçalves, 9500 - Campus do Vale - CEP: 91501-970 - Porto Alegre/RS, Brasil

jean.espinoza@riogrande.ifrs.edu.br

²Universidade Federal do Rio Grande – FURG

Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia da Criosfera - Laboratório de Monitoramento da Criosfera

Av. Itália, Km 8, CEP: 96201-900 - Rio Grande/RS, Brasil

jorgearigony@furg.br

³Instituto Antártico Chileno – INACH

Departamento Científico - Recursos Naturales / Glaciología

Plaza Muñoz Gamero 1055, Punta Arenas, Chile

rjana@inach.cl

Recebido em 26 de Junho, 2014/ Aceito em 06 de Setembro, 2014

Received on June 26, 2014/ Accepted on September 06, 2014

RESUMO

O propósito deste artigo é discutir a evolução dos métodos de simulação do retroespalhamento SAR em massas de neve, compreendendo as abordagens físicas e empíricas neste processo. O presente trabalho busca compilar os diversos modelos de retroespalhamento SAR de neve e gelo na faixa de microondas compreendida pela banda X propostos na literatura, comparando seus resultados, contribuições e limitações a fim de promover um material de orientação para pesquisa e emprego dos diversos modelos de retroespalhamento atualmente disponíveis. Assim, os principais modelos de retroespalhamento atuais serão descritos, implementados e finalmente comparados. Como fonte de validação dos modelos, serão considerados dados comuns de entrada, constituídos de dados estratigráficos e de temperatura da neve em um perfil de 2m de profundidade e dados SAR Cosmo-SkyMed na banda X coletados na região da geleira Union no verão antártico de 2011-2012

Palavras chaves: Sensoriamento Remoto por Radar, Geleira Union-Antártica, Retroespalhamento SAR.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to discuss the evolution of simulation methods SAR backscatter in masses of snow, including the physical and empirical approaches in this process. This study aims to build different models of SAR backscatter for snow and ice in the microwave range encompassed by the X-band proposed in the literature, comparing these results, contributions and limitations in order to promote a guidance material for research and employment for many backscatter models currently available. Thus, the main current backscatter models are described, implemented, and finally

compared. As a source of validation of models will be considered common input data, consisting of stratigraphic data and temperature of snow on a 2m depth profile data and *SAR Cosmo-SkyMed* listed in the X-band region at Union Glacier Antarctic summer 2011 -2012.

Keywords: Radar Remote Sensing, Union Glacier - Antarctica, SAR backscatter.

1. INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto com o uso de dados radar de abertura sintética para o monitoramento da cobertura de neve e gelo das regiões polares está consolidado como uma das principais técnicas empregadas no campo da glaciologia (YURCHAK, 2009). Neste contexto, a modelagem do retroespalhamento de dados-radar se mostra fundamental para a extração de informações sobre o comportamento da Radiação Eletromagnética (REM) na faixa de microondas ao longo da massa de neve e da cobertura de gelo, permitindo uma divisão de componentes como granulometria da neve, densidade, espessura, entre outros (JINYANG *et al.*, 2010).

A geração de um modelo do retroespalhamento de dados *SAR* de coberturas de neve e massas de gelo segue a sequência conceitual dado pela Figura 1-A. Com a constituição deste modelo, torna-se possível a aplicação de um modelo inverso, permitindo extrair informações físicas de dados *SAR* (Fig. 1-B).

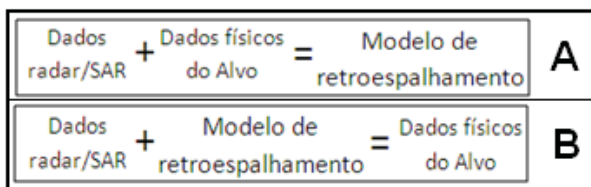


Fig. 1 - Conceito de um modelo de retroespalhamento.

Segundo Rott *et al.* (2008) o desenvolvimento de modelos para o retroespalhamento e a aplicação do problema inverso permite o uso de dados *SAR* para o entendimento de variáveis ligadas a estrutura e a dinâmica de massas de neve e gelo (e.g., acumulação da neve, equivalente de água teor de água líquida, etc.).

Resumidamente, dividem-se as abordagens empregadas para a construção dos modelos de retroespalhamento em duas categorias: modelos físicos e modelos empíricos (SIQUEIRA *et al.*, 1995). Um modelo é categorizado como físico quando seu equacionamento básico parte

dos modelos físicos de espalhamento (i.e., espalhamento *Mie*, *Rayleigh*, entre outros) e modelo empírico quando seu equacionamento é obtido pela análise de um conjunto de dados *SAR* específico. Em linhas gerais, a maioria dos modelos de descrição do retroespalhamento do sinal radar traz a característica de serem matematicamente complexos, fato este que dificulta a sua compreensão e o seu uso (ROTT *et al.*, 2008; SIQUEIRA *et al.*, 1995). Esta complexidade, por vezes, se faz necessária para descrever adequadamente os processos de interação das *REMs* com o alvo, mas esta complexidade leva ao uso restrito destes modelos para descrição da interação da *REM* com o alvo.

O retroespalhamento de um feixe *SAR* em uma massa de neve ou gelo está relacionado a três fatores (SHI e DOZIER, 2000):

1º) Os parâmetros dos sensores, os quais incluem a frequência, polarização e geometria da incidência;

2º) Os parâmetros da massa de neve ou gelo, incluindo densidade da neve, tamanho das partículas e variação de tamanho, o conteúdo de água líquida livre, características da distribuição espacial das partículas, viscosidade e a estratificação; e,

3º) Os parâmetros de subsuperfície, que incluem as características dielétricas do material, rugosidade na interface neve-solo e neve-gelo.

Além destes três fatores gerais determinantes, o coeficiente de retroespalhamento observado é afetado por vários parâmetros físicos da camada de neve (ULABY *et al.*, 1986; FUNG, 1994; PULLIAINEN *et al.*, 1994; KOSKINEN *et al.*, 2000). Estes parâmetros são:

- teor volumétrico de água líquida,
- profundidade da neve acumulada,
- rugosidade da superfície (interface ar-neve e neve-solo),
- tamanho dos cristais de neve (tamanho dos grãos) e forma do cristal de neve,
- perfil de densidade da neve acumulada,
- camadas (espessura, forma da interface entre camadas, variação dielétrica entre camadas, etc.).

Este grande número de fatores envolvidos na dinâmica do retroespalhamento de um feixe de radar em uma massa de neve ou gelo acaba tornando o modelo de interação por vezes complexo. Segundo Shi e Dozier (2000), progressos substanciais na modelagem desse tipo de retroespalhamento foram feitos empregando a física da dispersão. O Modelo de Transferência Radiativa (*MTR*) foi aplicado para modelagem do retroespalhamento de sinais de microondas sobre a cobertura de neve ou gelo, com resultados promissores para o entendimento dos processos de espalhamento do sinal *SAR* nestes alvos (TSANG, 1992; CHUAH *et al.*, 1996; TSANG, *et al.*, 2000).

O *MTR* leva em conta as interações entre ondas coerentes em função da distribuição e da posição das partículas alvo que interagem com esta onda, mostrando-se adequado para modelagem envolvendo a neve (DING e TSANG, 1988; DING *et al.*, 1994 ; ZURK *et al.*, 1994 ; TSANG *et al.*, 1985). Métodos complementares para refinamento da descrição dos processos de retroespalhamento, a partir de técnicas numéricas baseadas na matriz de duplicação (TJUATJA *et al.*, 1993; FUNG, 1994), são utilizados para descrever os efeitos de espalhamento múltiplo, trazendo um maior nível de detalhe aos modelos de retroespalhamento. Além destas abordagens para modelagem dos processos de retroespalhamento e interação das microondas com a neve e o gelo, um avanço recente constituem-se nos métodos de integração do retroespalhamento de volume, proposto por Chen e Fung (2004) e Jinyang *et al.* (2010), com ótimos resultados para superfícies de rugosidade diferenciada e de grandes dimensões. Estes avanços no desenvolvimento teórico apontam para perspectivas promissoras na implementação e uso de modelos de interação *SAR-neve* e *SAR-gelo* como forma de melhor entender e interpretar a resposta polarizada desses tipos de alvos

Em grande parte dos modelos vigentes atualmente, a dispersão do sinal-radar em uma massa de neve ou gelo é prevista como ocorrida por espalhadores esféricos homogêneos dispostos em uma única camada também homogênea. No entanto, a neve ou gelo natural tem distribuição complexa, com cristais irregulares e estratificação distinta (COLBECK, 1986; ROTT *et al.*, 2008; JINYANG *et al.* 2010). Relativamente poucas

iniciativas foram feitas no sentido de considerar o papel desempenhado pela forma dos cristais de neve/gelo, sua disposição e distribuição para construção dos modelos de retroespalhamento de sinais *SAR*.

O entendimento dos processos de interação do sinal radar com a neve e o gelo são fundamentais para um uso mais extenso das informações coletadas por sensoriamento remoto com uso de microondas, em especial para a banda *X*, com alta correlação com a estratigrafia do pacote de neve. Neste sentido, os impactos da estratificação neve em modelagens do retroespalhamento observado para dados de microondas ativos é também uma questão a ser respondida.

Um dos esforços de preencher esta lacuna na modelagem do retroespalhamento de sinais *SAR* em neve e gelo foi feito por Jinyang *et al.* (2010), trazendo uma descrição mais abrangente da neve natural. Jinyang *et al.* (*op cit.*) desenvolveram um modelo de retroespalhamento múltiplo para camadas de neve seca com base nos avanços teóricos na modelagem, construindo novas informações sobre os efeitos do espalhamento múltiplo, sobre as partículas de neve (i.e., grãos) e sobre a forma de estratificação da neve.

Contribuições recentes de Storvold *et al.* (2006), Yurchak (2009) e Thakur *et al.* (2013) mostram uma abordagem mais abrangente dos processos de interação das *REMs* na faixa de microondas com as massas de neve e gelo, apontando novos caminhos para a modelagem do retroespalhamento na faixa de microondas para massas de neve e gelo. Estas e outras propostas de modelagem do retroespalhamento têm caminhado em direção para considerar a contribuição do volume de neve e gelo e suas peculiaridades de conteúdo e forma.

Dentro deste panorama, o presente trabalho busca compilar os principais modelos de retroespalhamento para dados *SAR* atuais, traçando um paralelo entre os distintos modelos. Este paralelo tem o objetivo de permitir uma melhor escolha entre os distintos modelos, bem como introduzir a problemática da modelagem do retroespalhamento em suas distintas abordagens.

Para tanto, a implementação dos modelos de retroespalhamento *SAR* aqui descritos foram implementados para o pacote de neve da geleira

Union/Antártica (Fig. 2). A escolha desta área se deu por compreender uma área com neve e gelo (i.e., alvos de interesse) e pela disponibilidade de dados de campo sobre a estratigrafia do pacote de neve e dados SAR Cosmo-SkyMed.

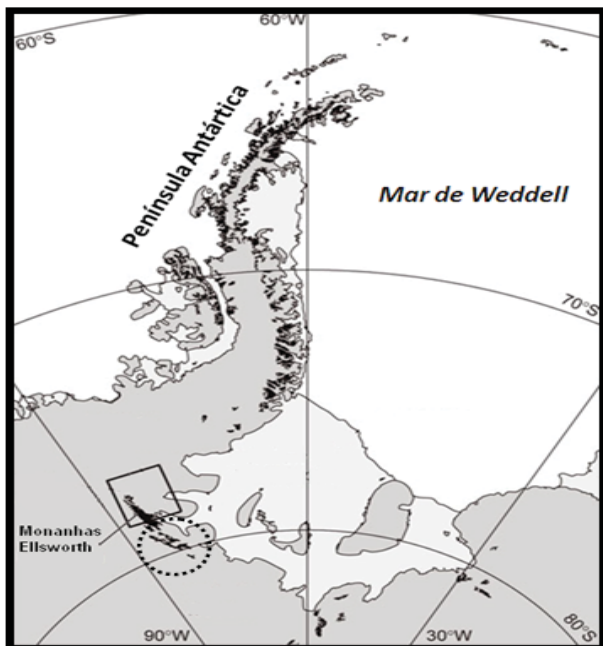


Fig. 2 - Adaptado de Gudmundsson e Jenkins, 2009. A elipse pontilhada aponta a região da geleira Union.

Este conjunto de dados de uma mesma área são fundamentais para permitir a implementação dos distintos modelos de retroespalhamento SAR e sua respectiva validação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para fins de comparação entre os distintos modelos de retroespalhamento SAR da neve aqui abordados, foram empregados dados estratigráficos do pacote de neve superficial obtidos em campo (i.e., *snowpits* obtidos ao longo da geleira Union – Antártica em um perfil vertical de 2m de escavação) e dados SAR de origem orbital (i.e., dados SAR-X Cosmo-SkyMed). Estes materiais foram processados com uso dos softwares MATLAB® e NEST®, originando a implementação dos modelos de retroespalhamento SAR-X de interesse e sua respectiva comparação. Cada um destes itens tem sua discussão em sequência.

2.1 Materiais

Neste item estão descritos os materiais utilizados no desenvolvimento do presente trabalho.

2.1.1 Imagem SAR Cosmo-SkyMed

No presente trabalho foram empregados dados SAR Cosmo-SkyMed - Banda X cobrindo a área de estudo (Geleira Union), exibido na Figura 3. A imagem SAR utilizada traz as características da Tab. 1.

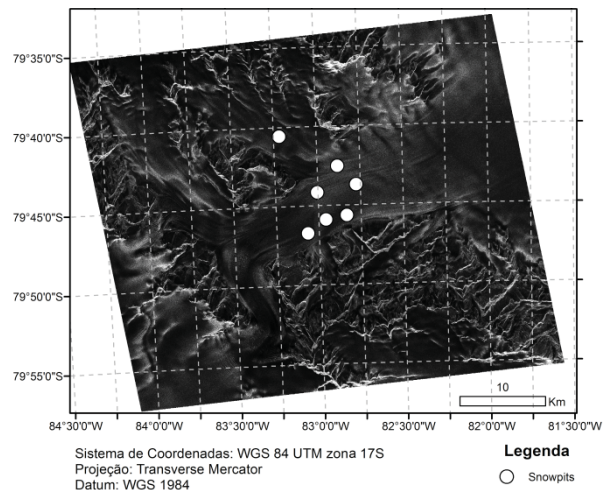


Fig. 3 - Imagem Cosmo-SkyMed empregada. Em branco estão marcados os locais de coleta dos dados de campo (trincheiras de campo - *snowpits*). A imagem foi adquirida na polarização VV, modo de aquisição HIMAGE/STRIPMAP com dimensão de 40x40 km, aproximadamente.

Tabela 1: Características da Imagem Cosmo-SkyMed utilizada

Sensor	Órbita	Forma de aquisição	data de aquisição
CSKS2	Desc. / 21378	Stripmap HIMAGE	20/12/2011.
Polarização utilizada / Banda		Área imageada (aproximadamente)	
VV / X		40x40 km	

Sobre a imagem SAR citada (Fig. 3) foram realizados os seguintes os passos padrão de pré-processamento junto ao software gratuito NEST®, fundamentais para utilização da mesma. Esses passos são discutidos em sequência.

2.1.1.1 1º passo de pré-processamento: Calibração

A correção radiométrica de dados SAR consiste na transformação dos valores pictóricos da imagem SAR de contadores digitais (CD) para valores de retroespalhamento, geralmente representados em uma escala logarítmica (i.e.,

escala decibel). Para a calibração radiométrica foi utilizado o *software NEST*®, empregando o algoritmo de calibração desenvolvido por Laur *et al.* (2004) – equação 1:

$$\sigma_{linear}^0 = \left(\frac{1}{N} \sum_{i,j=1}^N CD_{i,j}^2 \right) X \frac{1}{K} X \frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } \alpha_{referência}} \quad (1)$$

onde,

- σ_{linear}^0 : coeficiente de retroespalhamento do feixe de micro-ondas;

- N: número de pixels dentro da área de interesse (i.e., um conjunto de pixels correspondentes ao alvo);

- i e j: alcance e azimute locais dos pixels par o alvo contendo N pixels;

- $CD_{i,j}$: representa o valor de intensidade do pixel em contadores digitais, referente a um pixel na posição (i, j);

- k: constante de calibração absoluta do sensor (i.e., presente na documentação da imagem/sensor);

- α : ângulo médio de incidência para o alvo; e,

- α_{ref} : ângulo de referência para o feixe incidente Considerado como 23°, adotando-se o terreno como sendo plano - Laur *et al.*, 2004).

Com o emprego desta equação sobre os valores dos contadores digitais de uma imagem SAR-X, aplica-se a transformação dos valores de cada unidade pictórica da cena para uma escala de retroespalhamento. Estes valores de retroespalhamento podem ser descritos em uma escala logarítmica, inferindo valores em decibel para cada unidade da imagem. Essa transformação dos valores dos pixels de contador digital (CD) para valores de coeficiente de retroespalhamento em escala decibel, empregando os fatores de calibração presentes nos metadados da imagem.

2.1.1.2 2º passo de pré-processamento: Redução do ruído de *speckle*

Como forma de redução do ruído *speckle*, característico de dados SAR, foi aplicado um filtro de mediana com janela de 5x5 pixels, selecionado após a aplicação do teste de desempenho proposto por Jensen (2012). Como forma de avaliar o desempenho da filtragem do *speckle*, foram selecionadas áreas de teste

ao longo da imagem, caracterizando alvos homogêneos (i.e., amostras puras). Para cada uma destas amostras de teste, foi estimada a variância, sendo o desempenho de cada filtro determinado pela avaliação da variância interna de cada classe. Um filtro de *speckle* deve:

1. Preservar a média de uma classe;
2. Reduzir o desvio padrão interno de uma classe;
3. Preservar as bordas dos objetos contidos na imagem;
4. Preservar a informação textural característica de cada classe.

Assim, segundo Jensen (2012), um filtro de *speckle* se mostra eficiente quando reduz a variância interna de uma classe, preservando as fronteiras espaciais dos alvos (i.e., bordas). Como forma de determinar a eficiência de um filtro de *speckle* aplicado sobre uma cena SAR-X, utiliza-se a razão entre o desvio padrão e média de amostras puras, conhecido como coeficiente de variação ou *índice de speckle* - σ_v (LEE *et al.*, 1994; JENSEN, 2014), dado pela equação 2:

$$\sigma_v = \frac{\sqrt{\text{var}(z)}}{\mu[z]} \quad (2)$$

Quanto menor o valor determinado para *índice de speckle*, melhor é o desempenho do filtro empregado. No presente trabalho, como forma de redução do *speckle* presente nas cenas Cosmo-SkyMed utilizadas, foi empregada a filtragem do *speckle* através de duas técnicas: filtro de Mediana, sugerida para dados de baixa resolução espacial por Arigony-Neto (2006) e a Filtragem com o uso do filtro adaptativo de Lee, indicada por Velho *et al.* (2011). Cada um dos filtros foi empregado através de janelas de convolução com resoluções de 3x3, 5x5 e 7x7 pixels.

Como resultados, foram obtidos valores de variância e índices de *speckle* menores para o filtro de mediana com uma janela de convolução de 5x5 pixels, sendo este o filtro adotado para o pré-processamento de todas as cenas Cosmo-SkyMed utilizadas neste trabalho. Os resultados do experimento realizado para escolha dos filtros são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: representação do desempenho dos filtros de *Lee* e mediana sobre as cenas *Cosmo-SkyMed* de interesse

Parâmetro estatístico de avaliação	Mediana 3x3	Mediana 5x5	Mediana 7x7
Índice de Speckle médio das classes (módulo)	0,287	0,108	0,391
Parâmetro estatístico de avaliação	Lee 3x3	Lee 5x5	Lee 7x7
Índice de Speckle médio das classes (módulo)	0,436	0,749	0,379

Notadamente, esperava-se um melhor desempenho para o filtro de *Lee* para cenas *Cosmo-SkyMed* de alta resolução espacial como as abordadas aqui (VELHO *et al.*, 2011). O melhor desempenho apresentado pelo filtro de mediana com janela de convolução de 5x5 pixels se explica pelas particularidades do alvo (i.e., cobertura de neve superficial) e do dado *SAR* utilizados.

2.1.1.3 3º passo de pré-processamento: Ortorectificação

A correção geométrica das cenas *SAR* visa a representação espacial dos dados *SAR-X* em um sistema de coordenadas geográficas padrão. Os valores de retroespalhamento *SAR-X* observados em uma cena são relacionados diretamente a forma e orientação do terreno imageado, o que permite obter uma imagem *SAR-X* simulada a partir da geometria do terreno.

Por conta das dificuldades em selecionar pontos de controle entre uma cena previamente registrada e uma cena *SAR-X*, emprega-se um algoritmo de correlação cruzada que, baseado na relação linear existente entre duas imagens (i.e., uma imagem referência, previamente registrada e uma imagem a ser *co-registrada*), considerará dois pontos homólogos obtidos em cada uma das cenas como coincidentes quando o índice de correlação entre cada um destes pontos for máximo (i.e., igual a 1).

Esta ferramenta de referenciamento espacial para dados *SAR* está disponível em softwares proprietários (e.g., *ERDAS IMAGE®* e *ENVI®*) e softwares livres (e.g., *NEST 4C*, *PolSAR*). No presente trabalho utilizou-se o software *NEST 4C* para acessar esta ferramenta de referenciamento espacial.

Assim, o algoritmo de correlação cruzada percorre a cena de referência e a cena a ser

co-registrada, buscando regiões de máxima correlação. Ao selecionar áreas homólogas com correlação máxima, são computados pontos de controle que serão posteriormente utilizados no *co-registro* da imagem, obtendo-se um conjunto pré-determinado de pontos de controle de forma automática. Este processo está simbolizado pela Figura 4.

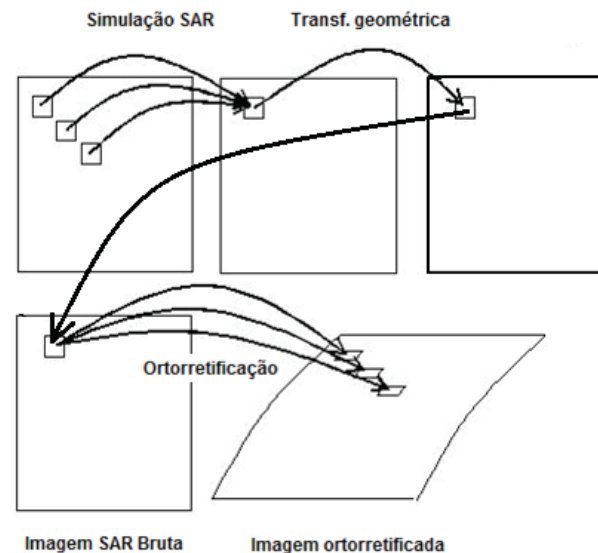


Fig. 4 - Representação do processo de ortorectificação de dados *SAR-X*.

A correção geométrica de dados *SAR-X* foi realizada junto ao software *NEST 4C* que aplica os seguintes passos de processamento sobre as imagens:

1. Geração de uma imagem *SAR-X* simulada a partir do modelo digital de elevação local (i.e., *ASTER GDEM*);
2. Seleção de 200 pontos de controle entre a cena *SAR-X* e a imagem de referência (i.e., imagem simulada);
3. Transformação geométrica da imagem *SAR-X*, ajustando-a a um sistema de coordenadas previamente estabelecido (projeção cartográfica *UTM – datum* de referência *WGS84 – Zona 17S*) com aplicação do interpolador por convolução cúbica.

Com este processo, cada cena *SAR-X* utilizada foi representada em um sistema de coordenadas geográficas padrão, permitindo correlacioná-las espacialmente (i.e., *UTM-WGS84- 17S*). O processo constituiu a última etapa de pré-processamento imposta a dados *SAR-X*.

2.1.1.4 4º Passo de pré-processamento: Exportação da imagem para um novo formato

A exportação do arquivo de imagem Cosmo-SkyMed de seu formato padrão para o formato *GeoTiff* visou padronizar o formato de dados trabalhados, bem como facilitar a manipulação dos arquivos junto ao software MATLAB®. A exportação se deu através do software NEST 4C®, gerando arquivos de imagem SAR com resolução radiométrica de 16bits. Preservando a ortorretificação, sistema de coordenadas e calibração radiométrica anteriormente empregadas.

Estes passos iniciais de processamento foram fundamentais para permitir correlacionar os dados da imagem com os dados de campo. Este processamento prévio permite melhor avaliar a distribuição espacial dos alvos e a obtenção de seus valores de retroespalhamento, fundamentais para a comparação dos modelos de retroespalhamento aqui discutidos.

2.1.2 Dados estratigráficos da neve

Neste trabalho foram utilizados dados estratigráficos do pacote de neve superficial obtidos para uma área coincidente com a cobertura da imagem *Cosmo-SkyMed* empregada. Os dados estratigráficos (Tab. 02) constituíram a fonte de entrada dos dados sobre as características de campo da neve, necessárias para alimentação dos modelos de retroespalhamento SAR-X aqui implementados.

Tabela 2: Dados estratigráficos da neve utilizados nos modelos

Dados Estratigráficos
Densidade
Temperatura
Tamanho dos grãos de neve
Tipo de Cristal de neve analisado
Massa

Estes dados foram obtidos para sete trincheiras a fim de obter informações sobre a estratigrafia da neve (i.e., *snowpit*) devidamente georreferenciadas para futuro cruzamento destes com os dados SAR da imagem *Cosmo-SkyMed* utilizada. A localização da obtenção destes dados está exposta na Figura 5.



Fig. 5 - Localização dos *snowpits* representada sobre uma imagem ASTER. O símbolo “(★)” denota a localização dos *snowpit*.

Este conjunto de dados teve função calibração dos modelos de retroespalhamento SAR e posterior teste dos mesmos. Os dados estratigráficos de campo aqui descritos constituíram os dados de entrada dos distintos modelos, enquanto a localização dos pontos de coleta destes dados forneceu as coordenadas para extração dos valores de retroespalhamento da imagem SAR, posteriormente utilizados para fins de avaliação da consistência das modelagens.

2.2 Métodos

O presente trabalho propôs a implementação dos principais modelos de retroespalhamento SAR da neve, divididos em modelos de base empírica e modelos de base física, e a comparação estatística entre os valores de retroespalhamento estimados pelos modelos com os valores de retroespalhamento presentes em dados orbitais *Cosmo-SkyMed* coincidentes (i.e., espacial e temporalmente). Cada um destes passos metodológicos está abordado detalhadamente ao longo do trabalho.

2.2.1 Modelagem empírica

A modelagem empírica constitui uma abordagem de determinação de um modelo de retroespalhamento a partir de um conjunto específico de dados SAR e dados auxiliares de campo como, por exemplo, a estratigrafia do pacote de neve superficial. Nesta linha, Siqueira *et al.* (1995), Ulaby *et al.* (1986), Arslan (2000), Xiong *et al.* (2012) e Thakur *et al.* (2013)

trazem modelos empíricos para modelagem do retroespalhamento SAR. Em linhas gerais, os autores consideram certo conjunto de dados SAR, construindo a partir destes dados um modelo que descreva os mesmos adequadamente. Por serem estes modelos fundamentados na observação/ leitura de dados experimentais, estes modelos são designados empíricos (Tab. 3).

Tabela 3: Modelos empíricos para o Retroespalhamento SAR

Autor	Variáveis consideradas (entrada do modelo)	Saídas do modelo
Ulaby <i>et al.</i>	Ângulo de incidência, densidade da neve, raio médio das partículas, espessura, conteúdo de água líquida no pacote de neve (%).	Retroespalhamento em função das camadas, retroespalhamento em função do raio das partículas e o retroespalhamento em função da profundidade.
Siqueira <i>et al.</i>	Polarização, densidade, da neve, conteúdo líquido de água na neve em percentual, declividade da superfície, constante de polarização "D".	Retroespalhamento em função da profundidade observada.
Arslan <i>et al.</i>	Espessura da camada, profundidade, raio da partícula, ângulo de incidência, coeficiente de extinção.	Retroespalhamento em função do raio da partícula, Retroespalhamento em função do volume espalhador.
Xiong <i>et al.</i>	Dimensões, tamanho do grão, volume, profundidade e incidência.	Retroespalhamento em função do tamanho do grão, retroespalhamento em função do volume.
Thakur <i>et al.</i>	Ângulo de incidência, densidade da neve, raio médio das partículas, espessura, conteúdo de água líquida no pacote de neve (%).	Retroespalhamento em função do raio da partícula, retroespalhamento em função do volume espalhador.

A implementação de cada um destes modelos foi executada junto ao software MATLAB®, onde para cada um dos referidos modelos foi gerado um *script* de execução ("*.m"). Cada modelo, particularmente, terá suas considerações e equacionamentos, devidamente discutidos na sequência, segundo o que propunham seus autores.

2.2.1.1 Ulaby *et al.* (1986)

O modelo descrito por Ulaby *et al.* para a obtenção do retroespalhamento SAR apresenta um modelo semi-empírico baseado na matriz de Mueller (i.e., ou o operador de espalhamento Stokes) para o retroespalhamento de microondas. Partindo desta consideração e de

dados SAR Ulaby *et al.* propôs um modelo de retroespalhamento para neve/gelo (equação 3):

$$\sigma_0 = a \cdot m^b \cdot (\cos(\theta))^c \cdot [1 - \exp(-2d \cdot (r) \cdot (ks)^e)] \quad (3)$$

onde:

- m: declividade média quadrática da superfície;
- θ : ângulo médio de refração;
- r: raio médio dos espalhadores (i.e., grão)
- constantes "a", "b", "c", "d" e "e": fatores empíricos de ajuste do modelo.

Este modelo prioriza a simplicidade de considerações e determina simplificações nos processos de interação radiação-matéria, considerando-o constante para um dado tipo de alvo. Com esta consideração, o modelo considera todo o volume espalhador sendo homogêneo, sendo a densidade e as características granulométricas de entrada consideradas em seus valores médios.

2.2.1.2 Siqueira *et al.* (1995)

O modelo proposto por Siqueira *et al.* (1995) considera o comportamento do retroespalhamento SAR em função da profundidade como um comportamento de redução exponencial do sinal retroespalhado para uma dada polarização, ou seja, quanto mais profunda for a camada analisada, menos representativo é o sinal retroespalhado pelo volume desta camada. Desta forma, o sinal de um pixel constituinte de uma imagem SAR trará mais informação referente ao volume superficial deste pixel em detrimento das informações do volume de camadas mais inferiores da área deste pixel. Estas considerações, descritas para uma faixa de frequências de 35 à 94GHz, foram compiladas na forma de um modelo empírico do retroespalhamento, dado pela equação 4.

$$\sigma_{ij}^0 = A [1 - \exp(-Bh\psi_s \sec \theta')] e^{-Cm^2} \cos \theta + \frac{DT_0 \exp(-\tan^2 \theta / 2m^2)}{2m^2 \cos^4 \theta}, \quad \frac{m^2}{m^2} (4)$$

onde:

- i, j: polarizações v ou h;
- h: profundidade da neve (≥ 10 cm)
- ψ_s : densidade da neve em g/cm³;
- m_v : possível conteúdo líquido interno ao pacote de neve (neve seca: $m_v=0$);
- m: declividade média quadrática da superfície;

- D: constante do modelo (D=1 para polarização *hh* ou *vv* e D=0 para polarização *hv*);
 - ϵ_s : permissividade dielétrica da neve ($\epsilon_s = 1, -1,832ps + 0,03mv$);
 - θ : ângulo médio de refração;
- Os coeficientes *A*, *B*, *C* e *x* foram empiricamente determinados como funções do diâmetro médio dos cristais de neve e estão presentes em sequência (Tab. 04).

Tabela 4: Coeficientes do modelo de retroespalhamento SAR proposto por Siqueira *et al.*, 1995

	35 GHz			94 GHz		
	<i>vv</i>	<i>hh</i>	<i>hv</i>	<i>vv</i>	<i>hh</i>	<i>hv</i>
<i>A0</i>	1,7	1,87	1	1,5	1,7	0,85
<i>A1</i>	1,33	1,33	0,51			
<i>B0</i>	0,67	0,67	0,67	0,214		0,126
<i>B1</i>	0,18	0,18	0,067			
<i>C</i>	1,6	1,6	2,2	0,75	0,75	0,7
<i>x</i>	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,8
<i>y</i>	1,5	1,5	1,5			
<i>z</i>	2,5	2,5	2,5			

Para fins de modelagem, os seguintes intervalos foram considerados:

- $10^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$
- $mv = 0$;
- $0,2 \leq \rho_s \leq 0,5 \text{ g/m}^3$;
- $0,5 \leq d \leq 5\text{mm}$;
- $0,1 \leq m \leq 0,8$;
- $0,1 \leq h \leq 100 \text{ cm}$.

Precisamente, o sinal SAR constituinte do retroespalhamento de um pixel deve ser considerado um *voxel* (*Volumetric Pixel* ou *Volumetric Picture Element* – indicando um pixel 3D). Esta consideração deve ser adotada por conta do sinal SAR ser retroespalhado não superficialmente pelo pixel, mas volumetricamente ao penetrar no volume composto pela área do pixel ao longo das camadas de penetração do sinal. O presente modelo considera uma penetração total limitada à 100 cm.

2.2.1.3 Arslan (2000)

Como proposta de modelo para o retroespalhamento SAR em neve e gelo o autor propõe uma solução empírica baseada em dados de zonas da Finlândia, com suporte de informações de campo. Em seu modelo Arslan

et al. (1999; 2000) propõe um retroespalhamento dado em um volume homogêneo e em parcelas não coerentes (evitando interferência entre as parcelas retroespalhadas) expresso pela equação 5.

$$\sigma_v^0 = \frac{c}{-2.a_1} \cdot [1 - e^{2.b.v}] \quad (5)$$

Onde:

- C: coeficiente empírico de retroespalhamento;
- a_1 : coeficiente empírico de extinção;
- b: diâmetro médio das partículas espalhadoras que compõe o volume de espalhamento

Para as modelagens a partir deste modelo foram considerados valores médios obtidos a partir dos dados de campo (i.e., *snowpits*). De posse destes dados, o modelo foi implementado dentro de intervalos semelhantes aos demais modelos, considerando profundidades, topografia e área semelhantes a fim de facilitar as comparações.

2.2.1.4 Xiong *et al.* (2012)

O autor propõe a estimativa do retroespalhamento através do cálculo da dispersão aleatória média ocorrida na série de estruturas 3D de um certo perfil de neve. Esse modelo proposto permite a aplicação de dados de entrada da massa de neve para estimativa do valor do retroespalhamento SAR supostamente medido (equação 6):

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_{max} \cdot [(4 \cdot \pi^2 \cdot N \cdot V^2 \cdot (n^2 - m^2))]}{((\lambda^4) \cdot ((n^2 + m^2)^2))} \quad (6)$$

onde as variáveis são:

- N: n° de partículas por centímetro cúbico;
- V: volume médio da partícula espalhadora = $4/3 \cdot \pi \cdot (r^3)$;
- r: raio médio da partícula espalhadora (grão);
- n: Índice de refração médio das partículas;
- m: Índice de refração do meio;
- λ : comprimento de onda radar incidente

No citado modelo, o maior fator de relação com o retroespalhamento mostra-se o tamanho do grão, o que está em conformidade com o esperado pela física do espalhamento, onde o fenômeno de difração/dispersão é diretamente dependente do tamanho do espalhador. Esta consideração faz com que o modelo, embora simples, tenha

resultados altamente correlacionados com o conteúdo do pacote de neve.

2.2.1.5 Thakur *et al.* (2013)

Este estudo utilizou diferentes considerações para estimar os cálculos de coeficientes de retroespalhamento do volume de neve. Como os grãos de neve são muito menores do que o comprimento de onda incidente da faixa de microondas, o espalhamento da neve pode ser gerado como um espalhamento de um volume único. Este volume espalhador tem características médias que formam um bloco de neve equivamente como o proposto por Shi e Dozier (2000) e, portanto, retroespalhamento total pode ser escrito segundo a equação 7:

$$\sigma_{pp}^t(k_0, \theta_i) = T_{pp}^2(\theta_i) \sigma_{pp}^g(k_1, \theta_r) \quad (7)$$

onde:

- σ_{pp}^t : retroespalhamento total dado em uma certa polarização;
- k_0 : número de ondas incidentes sobre a superfície de neve
- k_1 : número de ondas incidentes sobre a interface neve/gelo neve/solo;
- θ_i, θ_r : ângulo de incidência na interface neve-ar e ângulo de refração médio do volume espalhador
- T_{pp} : coeficiente de transmissão de *Fresnell* para uma dada polarização.

Com estas considerações tem-se a massa de neve assumida como sendo de uma só camada de densidade equivalente, em vez do bloco da neve de multi-camadas, que tem variações de densidade. Esta consideração simplifica em muito a aplicação do modelo, embora gere limitações para a extração a posterior de dados estariográficos pela inversão do modelo, haja visto que estes fatores são considerados constantes para todo o pacote de neve.

2.2.2 Modelagem física

Os modelos físicos para o retroespalhamento SAR partem da premissa das interações físicas da REM com a massa espalhadora (i.e., neve e/ou gelo, no caso). Esta abordagem não parte de um conjunto específico de dados SAR, mas sim de considerações sobre o tipo de processo físico envolvido no espalhamento e

seu equacionamento físico para construção do modelo de retroespalhamento. Sob esta óptica, Baghdadi *et al.* (2000), Nagler & Rott (2000), Albert *et al.* (2005), Jinyang *et al.* (2010) e Phan *et al.* (2012) construíram modelos físicos para o retroespalhamento SAR. Estes autores consideram os processos físicos de espalhamento que dados SAR estão submetidos (i.e., espalhamento *Mie*, *Rayleigh* e espalhamento não-seletivo, entre outros). Com esta consideração, constituem-se modelos fundamentados na interação física do feixe de REM SAR com o alvo, denominando estes modelos como modelos físicos do retroespalhamento (Tab. 5).

Tabela 5: Modelos físicos para o Retroespalhamento SAR

Autor	Variáveis consideradas (entrada do modelo)	Saídas do modelo
Phan <i>et al.</i>	Tipo de grão de neve, densidade da neve, conteúdo líquido de água, ângulo de incidência, temperatura.	Retroespalhamento em função do raio da partícula, retroespalhamento em função do conteúdo de água líquida (se houver) retroespalhamento em função da profundidade.
Nagler e Rott	Densidade da neve, raio médio das partículas, profundidade da camada.	Retroespalhamento em função do SWE, retroespalhamento em função do raio das partículas e o Retroespalhamento em função da profundidade das camadas.
Baghdadi	Densidade da neve, diâmetro médio das partículas, ângulo de incidência, profundidade da camada.	Retroespalhamento em função do diâmetro das partículas, Retroespalhamento em função da espessura das camadas.
Jinyang <i>et al.</i>	Densidade da neve acima da camada considerada, densidade da neve abaixo da camada considerada, profundidade da camada superior, profundidade da camada inferior, raio médio das partículas da cama inferior.	Retroespalhamento em função da profundidade analisada, Retroespalhamento em função do raio da partícula.
Albert <i>et al.</i>	Densidade da neve, camada, ângulo de incidência, raio das partículas, permissividade dielétrica.	Retroespalhamento em função do ângulo de incidência, Retroespalhamento em função da profundidade da camada e Retroespalhamento em função do raio das partículas.

A implementação de cada um dos referidos modelos, se deu a partir do software *MATLAB*®, onde para cada um dos mesmos foi gerado um *script* de execução (“*.m”). Cada uma destas modelagens será discutida devidamente em sequência, segundo o que propunham seus autores.

2.2.2.1 Phan et al. (2012)

O Modelo proposto por esses autores considera como primeira premissa ser o pacote de neve composto por camadas de neve coerentes e independentes. O primeiro passo da aplicação deste modelo consiste em estimar a permissividade elétrica de cada camada de neve.

Em tal modelo, em sequência, as perdas de intensidade devem ser computadas, considerando-se as interações entre o feixe de microondas e o volume espalhador composto por todo o pacote de neve. Ao somar a contribuição de cada camada para o retroespalhamento (i.e., integração), o modelo estima o valor do retroespalhamento para o volume do pacote de neve como um todo (σ_{vol}^0). Esta consideração é escrita matematicamente junto a equação (8), colocada a seguir:

$$\sigma_{vol}^0 = 4\pi \cos\theta_0 \sum_{k=1}^n Att_{up}(k..-1)T_{(k-1)k} \frac{1 - e^{-\frac{2k_e d^k}{\cos\theta_k}}}{2k_e^k} \dots P^k(\theta_k)T_{k(k-1)}Att_{down}(k-1) \quad (8)$$

O processo de interação da radiação de microondas com a neve que compõe o volume espalhador composto por múltiplas camadas de neve divide-se em quatro processos bem distintos. A saber: transmissão entre duas camadas, absorção pelas partículas de neve, espalhamento superficial e ao final do pacote de neve e recombinações coerentes entre feixes internamente espalhados. Este conjunto de processos complexos é sintetizado pela matriz de fase do meio P e pelo coeficiente de transmissão de Fresnel T , presentes na equação 6.

2.2.2.2 Baghdadi et al. (2000)

Tendo por base imagens SAR obtidas pelo satélite/sensor *RADARSAT*, de origem canadense, esses autores estruturaram um modelo de retroespalhamento para dados SAR baseado no *MTR*. Este modelo foi testado como

auxílio ao monitoramento de áreas de neve. O presente modelo (equação 9) foi utilizado como suporte a algoritmos voltados a diferenciação de zonas com neve úmida e neve seca, obtendo resultados consistentes. Este modelo é compilado pela equação 9:

$$\sigma_{vv}^0 = 10^{-2.35}(\cos^3\theta/\sin^3\theta)10^{0.046\varepsilon_r \tan\theta}(k_s \text{sen}\theta)^{1.1}\lambda^{0.7} \quad (9)$$

onde:

- θ = ângulo de incidência local;
- ε_t = permissividade dielétrica da neve;
- κ_s = é o coeficiente de dispersão de todas as camadas - de neve do volume;
- λ = comprimento de onda radar incidente.

Esta abordagem considera um pacote de neve superficial de interação com a radiação SAR de espessura constante e igual a 1m e grãos de tamanho único, homogêneo e igual a 2,5mm. Na implementação aqui exposta, estes valores foram limitados aos intervalos presentes nos snowpits, buscando aproximar o modelo a realidade da área de estudo.

2.2.2.3 Nagler e Root (2000)

Para estimar o retroespalhamento total do pacote de neve, considera-se neste modelo um retroespalhamento modelado como uma soma incoerente de vários componentes, correspondendo cada um a uma interface rugosa particular ou camada de espalhamento do volume. Para tanto, seguem-se algumas considerações:

- espalhamento simples;
- transmissão coerente descrito pelos coeficientes de transmissão de energia Fresnel;
- um único tamanho de partícula de grãos de neve, que estão atuando como dispersores independentes;
- a interação entre o limite inferior e o volume da camada de neve é desprezado;
- o pacote de neve superficial é composto por uma camada de neve homogênea;

A estimativa do retroespalhamento SAR em todo o volume de neve “ σ_{vol}^0 ” pode ser escrito, conforme Nagler e Root (2000), como (equação 10):

$$\sigma_{vol}^0(\theta_i) = \frac{K_s}{2k} \cos\theta_i T_{as}^2 \left(1 - e^{-\frac{2k_e d_s}{\cos\theta_i}}\right) P(\cos\theta_i, -\cos\theta_i, \pi) \quad (10)$$

onde:

- κ_s : é o coeficiente de dispersão de todas as camadas de neve do volume;
- θ : ângulo de incidência;
- T ; coeficiente de transmissão de Fresnell;
- P : é a matriz de fase do meio;
- d : diâmetro médio das partículas de espalhamento.

Os demais fatores estão descritos junto ao trabalho de Fung *et al.* (1994). O presente modelo simplifica a consideração das distintas camadas do pacote de neve superficial, mas considera as interações físicas no processo de retroespalhamento.

2.2.2.4 Jinyang *et al.* (2010)

Os autores propõem a modelagem teórica do retroespalhamento SAR da neve como base da compreensão das interações entre o feixe de microondas e o pacote de neve (i.e., volume de espalhamento). Considerando a complexidade do pacote de neve natural, o modelo proposto por Jinyang *et al.* (2010) constrói uma abordagem multi-camada, baseado em recentes avanços teóricos na modelagem da neve. Neste modelo:

- O volume de neve é dividido em múltiplas camadas ao longo do seu perfil vertical e as interações entre as camadas com diferentes propriedades dielétricas são calculados;
- Os cristais de gelo são modelados como elipsóides para descrever a irregularidade de forma (outros modelos geralmente os consideram esféricos).

A forma analítica da solução de primeira ordem da equação de transferência radiativa é usada como a base do modelo, que também é uma função da espessura óptica e da neve. O modelo desenvolvido traz suas parametrizações constituídas por três partes aqui expressas pelas equações “A”, “B” e “C”, representadas na Fig. 5. Estas representam o componente de retroespalhamento produzido na interface neve-ar (A), o componente de retroespalhamento formado pela interação entre a radiação de microondas e o volume (B) e a parcela do retroespalhamento composta pela interação entre a radiação de microondas e a interface neve-gelo ou neve-solo (C). Estas três componentes são exibidas pelo conjunto de equações “A”, “B” e “C” (Fig. 6):

$$\begin{aligned}
 \sigma_{v_pp} &= C_v \cdot 0.75 \cdot T_{pp}^2 \cdot \omega \cdot \mu \cdot [1 - \exp(-2\tau / \mu)] \\
 C_{v_pp} &= m_1 + (1.0 - \exp(-\tau / \mu)) \cdot m_2 \cdot \omega \\
 \log(\sigma_{v_pq}) &= m_3(\tau) \cdot \exp(\log(\sigma_{v_pp}) / m_4(\tau)) + m_5(\tau)
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \sigma_{v_pp} \\ C_{v_pp} \\ \log(\sigma_{v_pq}) \end{aligned}} \right\} A$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{vs_hh} &= C_{vs_hh} \cdot T_{pp}^2 \cdot \omega \cdot (1.0 - \exp(-\tau / \mu)) \cdot \exp(-\tau / \mu) \cdot R_h \\
 C_{vs_hh} &= n_1 \cdot \exp^2(-\tau / \mu) + n_2 \cdot \exp(-\tau / \mu) + n_3 \cdot R_h + n_4 \cdot R_h^2 + n_5 \\
 \log(\sigma_{vs_vv}) &= n_6 \cdot \log(\sigma_{vs_hh}) + n_7 \cdot \log(R_v / R_h) + n_8 \\
 \log(\sigma_{vs_vh}) &= n_9 \cdot \log(\sigma_{vs_hh}) + n_{10} \cdot \log(R_v / R_h) + n_{11} \\
 R_p &= R_{p_co} \cdot \exp(-(2 \cdot k_s \cdot \mu)^2) + \int R_{p_inco} d\Omega
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \sigma_{vs_hh} \\ C_{vs_hh} \\ \log(\sigma_{vs_vv}) \\ \log(\sigma_{vs_vh}) \\ R_p \end{aligned}} \right\} B$$

$$\sigma_{s_pq} = T_{pp}^2 \cdot \exp(-2\tau / \mu) \cdot \sigma_{g_pq}
 \quad \left. \vphantom{\sigma_{s_pq}} \right\} C$$

Fig. 6 – Representação do conjunto de equações do modelo de Jinyang *et al.* (2010).

Onde Cv_pp e Cvs_pp são os fatores de correção, ω é o albedo, τ é a espessura óptica, T é a transmissividade na interface ar-neve, μ é o ângulo de propagação, R_p é a refletividade efetiva. Os índices subscritos p e q denotam diferentes polarizações e m, n são coeficientes de regressão/ajuste listados na Tab. 6.

Tabela 6: coeficientes de regressão para o modelo de Retroespalhamento SAR de adaptado de Jinyang *et al.* (2010)

	Valor inicial	Limite Superior	Incremento de modelagem
Fração do volume da neve	0,1	0,4	0,05
Profundidade da neve	0,1 m	2,1 m	0,2 m
Raio da partícula de gelo	0,4 mm	3,2 mm	0,2 mm
Rugosidade superficial	0,5 cm	3,0 cm	0,5 cm
Correlação de comprimento	5,0 cm	25 cm	5 cm
Volume da unidade do solo	0,05	0,40	0,05

O presente modelo considera a presença de espalhamentos múltiplos e os efeitos de sinais de espalhamento do volume como um todo. Além disto, os autores consideraram nas equações a forma elíptica para os espalhadores, o que aproxima com maior precisão o modelo da realidade, haja visto a não homogeneidade absoluta das partícula da neve.

2.2.2.5 Albert *et al.* (2005)

Este modelo foi desenvolvido com base na teoria da transferência radiativa com a

incorporação da consideração da matriz da fase dos dispersores. A equação integral do modelo (equação 11) considera um conjunto espalhador-superfície de efeito múltiplo de espalhamento para as interfaces ar-neve e neve-interface de gelo. A equação descritora do modelo é:

$$\cos\theta \frac{d\bar{I}}{dz} = -\bar{\kappa}_e \bar{I} + \int \bar{P}\bar{I}d\Omega \quad (11)$$

onde \bar{I} , $\bar{\kappa}_e$ e \bar{P} são o vetor de Stokes, matriz de extinção e matriz de fase e do meio, respectivamente. As soluções são agrupadas em três grandes termos de dispersão, que são a superfície de dispersão ar-neve, de dispersão de superfície base-neve e o volume de espalhamento.

2.2.3. Avaliação estatística dos modelos

Como forma de avaliar a consistência das modelagens de retroespalhamento aqui abordadas e permitir a comparação entre os distintos modelos, fez-se a comparação dos valores de retroespalhamento modelados com os valores de retroespalhamento obtidos pela imagem SAR- X , *Cosmo-SkyMed*. Esta comparação foi realizada entre o valor modelado e o valor de retroespalhamento do pixel correspondente, através da plotagem da correlação linear entre essas variáveis. Por serem ambos os valores (i.e., valor de campo e valor modelado) valores de retroespalhamento, representado uma mesma data e condições geomorfológicas da cobertura de neve, pode-se adotar a regressão linear simples como forma de comparação, haja visto que as grandezas modeladas e aquelas obtidas por sensoriamento remoto representam o mesmo fenômeno e em igual escala de representação.

Para a análise das distintas correlações lineares obtidas, considerou-se a o coeficiente de determinação R^2 . Este coeficiente foi escolhido como índice de comparação por representar quanto um modelo linear consegue descrever um conjunto amostral de dados, sendo adotado a título de comparação o quanto um dado modelo de retroespalhamento SAR foi capaz de prever valores de retroespalhamento SAR obtidos pelo sensor *Cosmo-SkyMed*.

Assim, da compilação destes modelos, obtiveram-se valores de significância estatística R^2 que resumidamente correspondem ao quanto

um dado modelo consegue reproduzir dos valores observados. Estes valores de R^2 foram a base de comparação estatística para os distintos modelos, haja visto a simplicidade desta abordagem e sua interpretação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação dos passos metodológicos geraram conjuntos de dados contendo o retroespalhamento SAR estimado por cada modelo de retroespalhamento abordado e dados estatísticos da comparação mútua destes valores estimados com dados de retroespalhamento SAR obtidos via sensoriamento remoto orbital (i.e., dados *Cosmo-SkyMed*). Por fim, considerando a comparação entre os resultados obtidos via modelagem e os dados de retroespalhamento SAR *Cosmo-SkyMed* foram apontados os modelos de retroespalhamento mais indicados para a modelagem de dados de retroespalhamento SAR de massas de neve em zonas de neve seca, semelhantes a região da geleira *Union*.

3.1 Retroespalhamento obtido pelos modelos empíricos

O retroespalhamento estimado a partir de distintos modelos empíricos para o retroespalhamento SAR aplicados a banda X mostrou valores relativamente acurados para o retroespalhamento SAR, quando comparados a dados de campo (Fig.7). Estas estimações apontaram uma evolução cronológica dos modelos, sendo os melhores resultados, com maiores valores de coeficiente de determinação (R^2) em correlação aos valores de campo, para o modelo empírico proposto por Thakur *et al.* (2013) e o menor erro padrão observado para o modelo de Arslan *et al.* (2000), expostos na Fig. 6-A.

Em análise aos valores de retroespalhamento estimados, tem-se valores de retroespalhamento apontando a robustez de todos os modelos, com maior fidelidade aos valores reais para os modelos de Thakur *et al.* (2013) e Arslan (2000). Cabe aqui ressaltar que o número reduzido de amostras de controle de campo limita a comparação, fazendo com que mesmo valores altos para o coeficiente de determinação R^2 acabem não traduzindo corretamente os comportamentos encontrados para os modelos. Para o uso destes modelos de retroespalhamento de maneira sistemática se faz

Comparação entre os Principais Modelos para o Retroespalhamento SAR da Neve

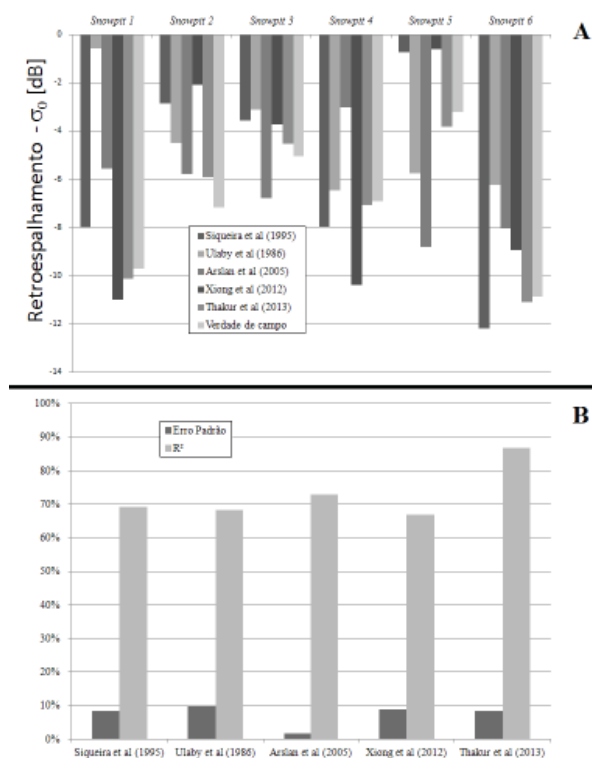


Fig. 7 - Valores estimados para o retroespalhamento por distintos modelos empíricos em comparação aos valores de campo.

necessário a obtenção de pontos de controle em campo contendo os valores de retroespalhamento reais, permitindo uma calibração personalizada de cada modelo.

3.2 Retroespalhamento obtido pelos modelos físicos

O retroespalhamento estimado a partir dos cinco modelos físicos para o retroespalhamento SAR aqui discutidos, aplicados à banda X, mostraram valores relativamente acurados para o retroespalhamento SAR, quando comparados a dados de campo (Fig. 8). Estas estimativas exibiram uma superioridade dos modelos físicos quando comparados aos modelos empíricos. Esta afirmação se apoia no fato de que os modelos físicos apresentaram um coeficiente de significância R² em média de 87%, enquanto os modelos empíricos expressaram média de 73%.

Esta significância estatística foi obtida em base à 6 pontos de controle em campo e em análise a dados de retroespalhamento de uma cena *Cosmo-SkyMed* contendo aproximadamente 200 mega-pixels ao longo da área de interesse. Para uma maior consistência dos resultados, torna-se necessário um universo amostral maior

(i.e., $n > 30$), algo que se torna inviável para a área de interesse em virtude do acesso e condições climáticas encontradas.

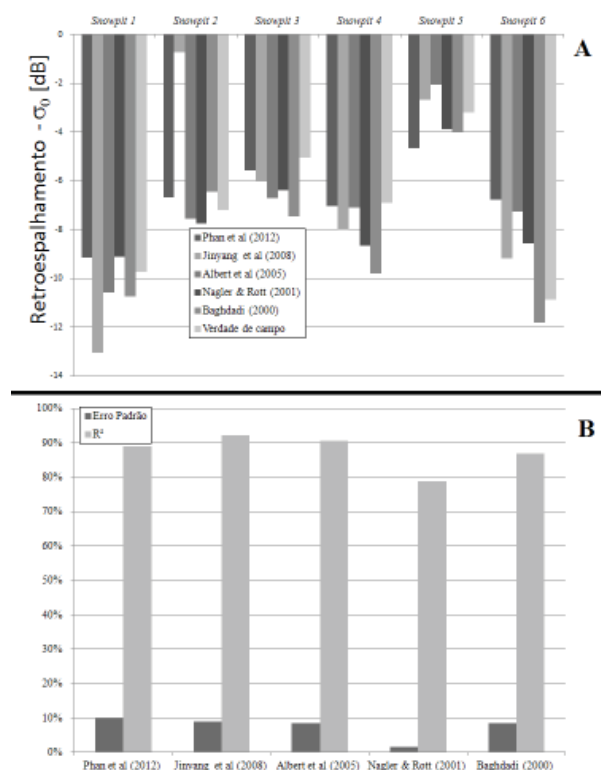


Fig. 8 - Valores estimados para o retroespalhamento por distintos modelos físicos em comparação aos valores de campo.

A maior capacidade dos modelos físicos em representar os valores de retroespalhamento para área de estudo em questão explica-se pelo fato destes modelos não serem dependentes dos valores de estimação locais e sim dos processos físicos neles envolvidos (JINYANG *et al.*, 2008).

Esses valores de retroespalhamento estimados por distintos modelos apresentam valores bem próximos, embora distintos. Este fato explica-se pelo pequeno número de amostras analisadas (apenas 6 amostras), número este insuficiente para afirmações estatísticas consistentes. Afirmações e comparações mais consistentes podem ser obtidas com a análise dos valores estimados pela inversão dos modelos, onde ao invés de estimarmos as características de retroespalhamento, utilizamos os valores de retroespalhamento de uma imagem e o modelo reverso para estimar grandezas físicas do alvo como os tamanhos de grão, camadas, presença de água, etc.

Estes valores podem ser visualizados

adequadamente na Fig. 7 que expõe as distintas estimações produzidas para cada modelo para o comportamento do retroespalhamento em função do tamanho dos espalhadores (i.e., grão).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho elenca as principais abordagens empregadas para a modelagem do retroespalhamento de dados SAR. Estas abordagens, de base empírica ou física, são fundamentais para o entendimento de dados radar, bem como a extração de informações dos alvos por meio da inversão destes modelos. Como o esperado, os melhores resultados foram àqueles observados para os modelos físicos, haja visto a não dependência destes com o local de desenvolvimento. Modelos empíricos tendem a não apresentar um desempenho homogêneo para dados de entrada com natureza distinta daqueles utilizados em seu desenvolvimento. Esta consideração fica evidente pela comparação, embora limitada, entre os valores modelados e aqueles observados na imagem *Cosmo-SkyMed* de referência. Este trabalho visa constituir um material de consulta e familiarização dos principais modelos de retroespalhamento SAR de forma a proporcionar uma comparação e indicação de consulta para aqueles que estejam interessados em abordar o uso de dados SAR.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERT, M.D., EWE, H.T. e CHUAH, H.T: Model Development and Analysis of Radar Backscatter in Ross Island, Antarctica. **Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE**. Editora IEEE, Vol. 2., pg. 1361 – 1364, 2005.

ARIGONY-NETO, J., SAURER, H., JAÑA, R., RAU, F., SIMÕES, J. C., GOSSMANN, H.: Monitoring snow parameters on the Antarctic Peninsula using satellite data: A new methodological approach. European Association of Remote Sensing Laboratories, **EARSeL eProceedings**. Vol. 5, no. 1, pg. 100-110, 2006.

ARSLAN, A. N., KOSKINEN, J., PULLIAINEN, J. e HALLIKAINEN, M.: A Semi empirical backscattering model snow using SAR data. Editora IEEE, **Geoscience and Remote Sensing review**, Vol. 6, pg. 1904-1906, 2000.

ARSLAN, A.N., PRAKS, J., KOSKINEN, J. e

HALLIKAINEN, M.: An empirical model for retrieving water equivalent of dry snow from C-band SAR data, **Geoscience and Remote Sensing Symposium**. Vol. 3, no. 1, pg. 1789 -1791, 1999.

BAGHDADI, N., GAUTHIER, Y., BERNIER, M. e FORTIN, J.P.: Potential and limitations of RADARSAT SAR data for wet snow monitoring. **IEEE T. Geoscience and Remote Sensing**, Vol. 38, no. 1, pg. 316-320, 2000.

CHEN, K. e FUNG, A.: An update on the iem surface backscattering model. **Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE**, Vol. 1, no. 2, pg. 75 – 77, 2004.

CHUAH, H. T., TJUATJA, S. FUNG A. K e BREDOW, J. W.: A phase matrix for a dense discrete random medium - Evaluation of volume scattering coefficient, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Vol. 34, no.5, pg. 1137-1143, 1996.

COLBECK, S.C.: Classification of seasonal snow cover crystals, **Water Resources Research**, Vol. 22, pg. 59-70, 1986.

DING, K. H., & TSANG, L.: Effective propagation constants of dense nontenuous media with multi-species of particles. **Journal of Electromagnetic Waves and Applications**, Vol. 2, pg. 757–777, 1988.

DING, K. H., ZURK, L. M., & TSANG, L.: Pair distribution functions and attenuation rates for sticky particles in dense media. **Journal of Electromagnetic Waves and Applications**, Vol. 8, pg. 1585–1604, 1994.

FUNG, A. K.: Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications. Editora **Artech House, Norwood, MA**. ISBN: 1608070379, 9781608070374, 430 pg. 1994.

FUNG, K. A., TJUATJA, S. e BREDOW, J.W.: A scattering model for snow-covered sea ice. **IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing** Vol. 30, no. 4, pg. 804 – 810, 1992.

JENSEN, J.R.. Introductory Digital Image Processing, 3^aed. New Jersey, Editora Prentice-Hall, ISBN-10: 0131453610, 479 pg., 2014.

JINYANG, D., SHI, J. E ROTT, H.: Comparison BETWEEN a multi-scattering and multi-layer

- snow scattering model and its parameterized snow backscattering model **Remote Sensing of Environment**, Vol. 114, no. 5, pg. 1089 –1098, 2010.
- KOSKINEN, J. PULLIAINEN, J. LUOJUS, K. e TAKALA, M.: Monitoring of snow-cover properties during the spring melting period in forested areas, **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, Vol. 48, no. 1, pg. 50 –58, 2010.
- KOSKINEN, J., METSMKI, S. GRANDELL, J. JNNE, S. MATIKAINEN, L. e HALLIKAINEN, M.: Snow monitoring using radar and optical satellite data, **Remote Sensing of Environment**, Vol. 69, pg. 16–29, 1999.
- LAUR, H. BALLY, P.; MEDOWNS, P.; SANCHEZ, J.; SCHÄTTLER, B.; LOPINTO, E.; ESTEBAN, D.. Derivation of the backscatter coefficient σ_0 in ESA ERS SAR PRI products. 5 ed. ESA, 2004. 53p., (**Documento ESA/ESRIN**, ESTN-RS-PM-HL09, v.2), 2004.
- LEE J. S., I. JURKEVICH, P. DEWAELE, P. WAMBACQ and A. OOSTERLINK: Speckle filtering of synthetic aperture radar images: a review. **Remote Sensing Reviews** Vol. 8, pg. 313-340, 1994.
- NAGLER, T. e ROTT, H.: Retrieval of wet snow by means of multitemporal SAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Vol. 38, no. 2, p.g. 754-765, 2000.
- PHAN, X., FERRO-FAMIL, L., GAY, M., DURAND, Y., DUMONT, M., ALLAIN, S. e D'URSO, G.: Analysis of snowpack properties and structure from TerraSAR-X data, based on multilayer backscattering and snow evolution modeling approaches. **In review for International JSTARS**, pg. 1189-1211, 2012.
- PULLIAINEN, J. HEISKA, K. HYYPPÄ J. e HALLIKAINEN, M.: Backscattering Properties of Boreal Forests at C- and X-Band, **IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing**, Vol. 32, no. 5, pg. 1041-1050, 1994.
- ROOT, H.: The Analysis of Backscattering Properties from SAR Data of Mountain Regions. **IEEE Journal of Oceanic Engineer** Vol. 059, no. 5, pg. 347-355 1984.
- ROTT, H., NAGLER, T. HEIDINGER, M. MÜLLER, F. e MACELLONI, G.: CoReH2O – A Ku- and X-Band SAR Mission for Snow and Ice Monitoring. **Final Report. ESA ESTEC** Contract no. 22830/09/NL/JC, 33 pg., 2008.
- ROTT, H. NAGLER, T. HEIDINGER, M. MÜLLER, F. e MACELLONI, G.: CoReH2O: Development of Snow Retrieval Algorithms for CoReH2O. **Final Report. ESA ESTEC** Contract No. 22830/09/NL/JC . 228 pg., 2012.
- ROTT, H., NAGLER, T., VOGLMEIER, K., KERN, M., MACELLONI, G., GAI, M., CORTESI, U., SCHEIBER, R., HAJNSEK, I., PULLIAINEN, J. e FLACH, D.: Algorithm for retrieval of snow mass from KU and X band radar backscatter measurements. **Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS, IEEE**, - Munchen, Germany. pg. 135-138, 2012.
- SHI, J., e DOZIER, J.: Estimation of snow water equivalence using SIR-C/X-SAR, part II: Inferring snow depth and particle size. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Vol. 38, no. 6, pg. 2475–2488, 2000.
- SIQUEIRA. P. R. SARABANDI, K. e ULABY, F. T.: Semi-empirical model for radar backscatter from snow at 35 and 94 GHz. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, pg. 1498-1501, 1995.
- THAKUR. P. K. *et al.*: Interactive comment on by: Snow density retrieval using SAR data: algorithm validation and applications in part of North Western Himalaya **The Cryosphere Discuss.**, Vol. 7, pg. 1420–1422, 2013.
- TJUATJA, S., FUNG, A. K. e DAWSON, M. S.: An analysis of scattering and emission from sea ice. **Remote Sensing Reviews**, Vol. 7, pg. 83–106, 1993.
- TSANG, L. KONG J. e SHIN, R.: **Theory of Microwave Remote Sensing**, New York, USA. John Wiley & Sons Inc., 723 pg., 1985.
- TSANG, L. PAN, J. LIANG, D. LI, Z. CLINE, D. e TAN, Y.: Modeling active microwave remote sensing of snow using dense media radiative transfer (dmrt) theory with multiple-scattering effects. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, Vol. 45, no. 4, pg. 990 –1004, 2007.
- ULABY, F., MOORE, R. e FUNG, A.: Microwave

- remote sensing, active and passive, Volume III. **Artech House, Norwood, MA**, 685 pg., 1986.
- XIONG, C., SHI, J., BROGIONI, M e TSANG, L.: Microwave snow backscattering modeling based on two-dimensional snow section image and equivalent grain size. **International Symposium on Geoscience and Remote Sensing – IGARSS 2012**, pg. 151-153, 2012.
- YURCHAK, B.S.: Some features of the volume component of radar backscatter from thick and dry snow cover. **In Advances in Geoscience and Remote Sensing.**) Cap. 6: Vukovar, Croatia, pg. 93-140, 2009.
- VELHO, L.F.; ARIGONY-NETO, J.; SIMÕES, J.C. Utilização do Filtro de Lee na redução do speckle em imagens SAR usadas na determinação da velocidade de geleiras. **Revista Brasileira de Cartografia - RBC**, Vol.63, pg.254-265, 2011.
- ZURK, L., DING, K. TSANG, L. e WINEBRENNER D.: Monte Carlo Simulations of the Extinction Rate of Densely Packed Spheres with Clustered and Nonclustered geometries, **Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS - 1994)**, Pasadena, USA., pg. 535-537, 1994.