

# Investigação geofísica de um glaciar de escombros nos Andes Argentinos

Paola Machado Barreto Manhães

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil,  
paola\_manhaes@yahoo.com.br

José Tavares Araruna Jr.

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, araruna@puc-rio.br

Omar del Castillo

Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina, omardelcast@unsj.edu.ar

Zulma Menna

Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina, zemenna@unsj.edu.ar

## RESUMO:

Este trabalho tem como objetivo verificar a eficiência do uso do Ground Penetrating Radar (GPR) na investigação de glaciares de escombros para mapeamento de camadas de gelo em subsuperfície. Neste trabalho foi realizada a investigação em um glaciar coberto, situado a 4600m de altitude, próximo ao Glaciar Agua Negra, situado nos Andes Argentinos. Após o processamento das imagens obtidas de um levantamento geofísico realizado com a antena não blindada de 50MHz, foi possível observar a camada de neve recentemente acumulada acima dos escombros, bem como localizar grandes blocos de rocha em meio aos detritos depositados. Adicionalmente identificou-se uma camada de gelo localizada sob os escombros, sobre a qual existe grande interesse em se conhecer o processo hidrogeológico com o passar do tempo devido aos efeitos das mudanças climáticas. Sendo assim, de posse desses resultados é possível quantificar o volume de gelo presente na seção investigada.

**PALAVRAS-CHAVE:** GPR, Geofísica, Glaciar, Mudanças Climáticas

## 1 INTRODUÇÃO

O complexo de glaciares localizado nos Andes Argentinos é uma importante fonte de abastecimento de água na província de San Juan cuja precipitação média é inferior a 100mm/ano (Angillieri, 2009). Devido às mudanças climáticas, o efeito de derretimento dos glaciares tem se acelerado e, portanto, é de grande importância para a segurança hídrica da referida província determinar o encolhimento dos glaciares.

Nesta região existem três tipos de glaciares: os glaciares descobertos, os glaciares cobertos e os glaciares de rocha. Os glaciares descobertos são mais comumente conhecidos. Neles o gelo foi formado durante a era Cenozoica e fica

exposto superficialmente (Clapperton, 1983). Pela maior facilidade de identificação destes glaciares, eles são mais facilmente mapeados e o acompanhamento do desenvolvimento do degelo (descarga/recarga) pode ser realizado com ferramentas como fotografias aéreas georreferenciadas e imagens de satélites (Leiva, 1999; Angillieri, 2009; Masiokas *et al.*, 2009).

Ao se empregar esses artifícios é possível obter dados importantes para a compreensão dos mecanismos hidrogeológicos como informações de balanço de massa superficial dos glaciares. No entanto, somente com esses artifícios não é possível obter informações da real profundidade das reservas de gelo nos glaciares descobertos e suas propriedades.

Nos glaciares cobertos e nos glaciares de rocha a necessidade do uso de ferramentas não invasivas vai além do interesse no conhecimento das propriedades do gelo da subsuperfície e de suas profundidades. Nestes tipos de glaciares a complexidade é ainda maior pela necessidade de se conhecer a localização de camadas ativas e monitorar degradação e assoreamento dos detritos congelados (*i.e.*, *permafrost*) ao longo do tempo (Janke *et al.*, 2013; Janke *et al.*, 2015).

A fim de suprir a falta destas informações são utilizadas ferramentas não invasivas empregando métodos de investigação sísmica, elétrica ou eletromagnética (Previati *et al.*, 2011; Godio e Rege, 2015).

O GPR é um método não invasivo de investigação geofísica baseado na propagação de ondas eletromagnéticas. Esta técnica é capaz de realizar a prospecção do material existente em subsuperfície por onde o equipamento transita. A fonte transmissora emite pulsos eletromagnéticos na superfície e a antena receptora registra os sinais refletidos nas interfaces entre os diferentes materiais com propriedades eletromagnéticas distintas (*i.e.*, permissividade dielétrica, condutividade elétrica e magnética). Desta maneira, este equipamento pode ser utilizado para identificação das espessuras de camadas de gelo, de água, de gelo com detrito congelado e o maciço rochoso. Com o emprego do GPR também é possível distinguir as camadas de gelo formadas em tempos geológicos distintos em função de sua densidade (Forte *et al.*, 2013). Portanto, pelo fato do gelo ter uma constante dielétrica baixa, a escolha do equipamento a ser utilizado deve ser criteriosa em função da informação que se deseja obter.

O objetivo do presente trabalho é identificar as camadas constituintes de um Glaciar Coberto e estimar os materiais presentes nas respectivas camadas. Para isso será utilizada a técnica de investigação não invasiva de GPR.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A investigação foi realizada a, aproximadamente, 300 metros de distância da base do Glaciar Agua Negra, situado a 4650 metros de altitude. A localização da seção é apresentada na Figura 1. A referida prospecção foi realizada acima da camada de neve

recentemente depositada acima dos escombros e foi de 116 metros de comprimento em formato de “S”. Para a investigação foi utilizado o GPR da companhia *MalaGeoscience*, modelo *Ramac* com antena não blindada de 50 MHz.

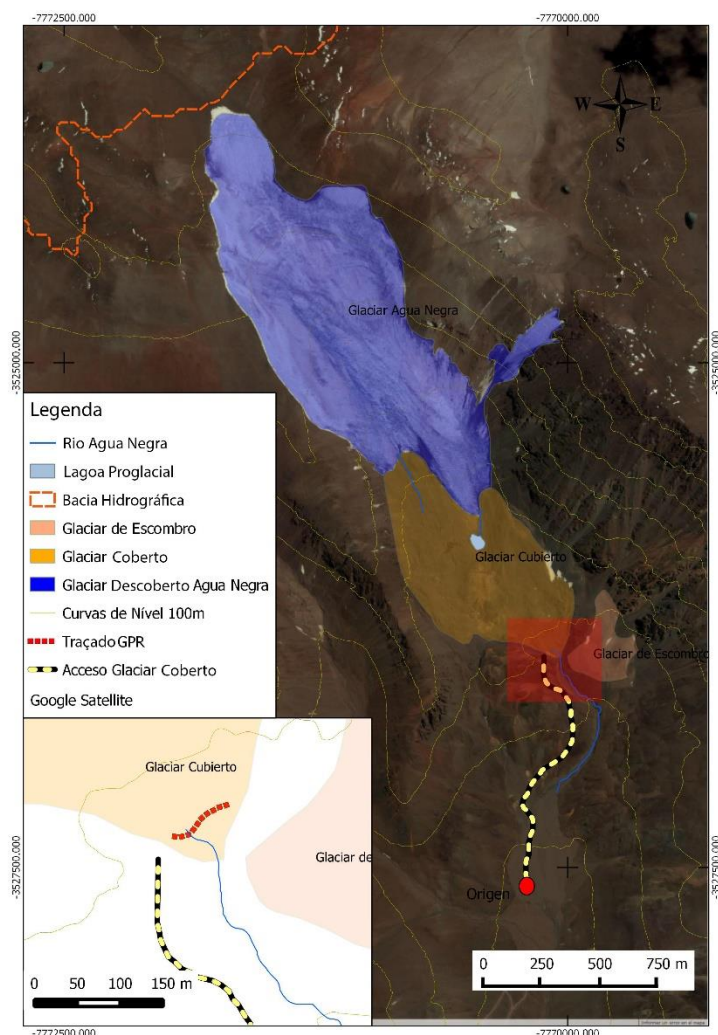
A região de neve depositada onde foi realizada a investigação possuía uma topografia irregular. A inclinação ora era paralela à seção investigada, ora era perpendicular. Devido a isso, durante a aquisição houve dificuldade de manter as antenas alinhadas.

O programa computacional utilizado para o processamento foi o *RadExplorer 1.41*. Nele foram aplicadas as rotinas de processamento *Background Removal*, *DC Removal*, *Time-Zero Adjustment*, *Amplitude Correction* e *Bandpass Filtering*, respectivamente.

As rotinas *Background Removal*, *DC Removal* e *Bandpass Filtering* foram utilizadas com a finalidade de reduzir ruídos. A primeira foi utilizada para remover ruídos relacionados à reflexão intensiva das camadas mais superficiais enquanto a segunda e a terceira foram utilizadas para reduzir ruídos referentes a problemas de concomitância de movimento do odômetro e da antena.

A rotina *Time-Zero Adjustment* foi utilizada com a finalidade de ajustar a cota inicial do solo e a velocidade de propagação da onda em função do tipo de solo, enquanto a rotina *Amplitude Correction* foi utilizada para tornar zonas de alta reflexão em maiores profundidades tão evidente quanto àquelas observadas em profundidades menores.

Após as etapas de processamento dos dados, realizou-se a interpretação das imagens através da análise de regiões com altos níveis de reflexão da onda. Essas regiões podem ser identificadas pela presença de tons mais intensos que caracterizam maior reflexão pela variação de propriedade eletromagnética do meio. Isso é possível observar quando se reduz o contraste da imagem ao ponto de identificar somente algumas regiões de reflexão (*i.e.* objetos enterrados ou interface entre materiais). Quando os objetos são pontuais ou quando a investigação passa transversalmente por objetos contínuos, as reflexões têm a forma de hipérboles conforme afirmam Maas e Schmalzl (2013).



a) Imagem de satélite da região onde foi realizada a investigação



b) Imagem fotográfica da aquisição da seção

Figura 1: Localização da seção investigada

A ocorrência de hipérboles pode representar a presença de elementos específicos enterrados como blocos de rocha, por exemplo. Já quando se percebe a ocorrência de intensas reflexões contínuas, ao longo de um trecho da seção ou de toda seção, pode-se considerar que existe ali a região limítrofe entre camadas de distintos materiais.

Na equação da velocidade de propagação do pulso (1), pode-se perceber que a velocidade ( $v$ ) de propagação varia com a constante dielétrica ( $k$ ) do meio e com a velocidade da luz ( $c$ ).

$$v = \frac{c}{\sqrt{k}} \quad (1)$$

Neste sentido, o método de ajuste de hipérbole proposto por Khan (2011) permite que se estime a constante dielétrica do meio a partir abertura da concavidade adotadas pelo operador baseadas na observação do radargrama.

### 3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Figura 2 apresenta o radargrama da seção investigada sem a aplicação dos recursos de processamento. Nela é possível observar a presença do ruído devido a grandes reflexões que ocorrem região mais superficial do solo. Neste sentido, após a aplicação da rotina *Background Removal* pode-se observar na Figura 3 que é possível distinguir maiores detalhes em toda imagem.

A maior quantidade de detalhes na imagem possibilitou a identificação de ruídos como as linhas verticais apresentadas na Figura 3. Este tipo de ruído provavelmente ocorreu devido a dificuldades impostas pela neve recentemente acumulada no local da investigação durante a aquisição. A presença da neve fresca fez com

que, em alguns momentos, o pneu do odômetro se arrastasse na neve ao invés de se deslocar em um movimento giratório, não registrando os movimentos da antena.

O resultado da aplicação da rotina *DC Removal* é apresentado na Figura 4 e é possível perceber que os ruídos de linhas verticais foi minorado, permitindo finalmente que a aplicação das rotinas de *Time-Zero Adjustment* e *Bandpass Filtering* fossem aplicadas, cujo resultado é apresentado na Figura 5.

Ainda assim foi observada a ocorrência de ruídos verticais semelhantes ao observados antes da aplicação da rotina *DC Removal*, provavelmente oriundas do mesmo problema impostos pela presença da neve fresca. Este problema foi minimizado após a aplicação do filtro de *Bandpass*, onde foram removidas interferências de ondas abaixo de 26MHz e acima de 322MHz, resultando na imagem apresentada na Figura 6.

Com o processamento devidamente finalizado, realizou-se a interpretação do radargrama visto na Figura 7. Na direita da imagem encontra-se a ordenada do tempo de propagação, em nanossegundos (ns) e na esquerda da imagem encontra-se a ordenada da profundidade, em metros (m).

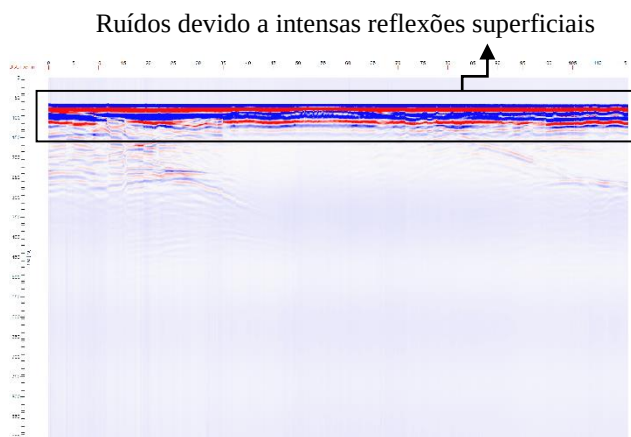


Figura 2: Seção sem processamento

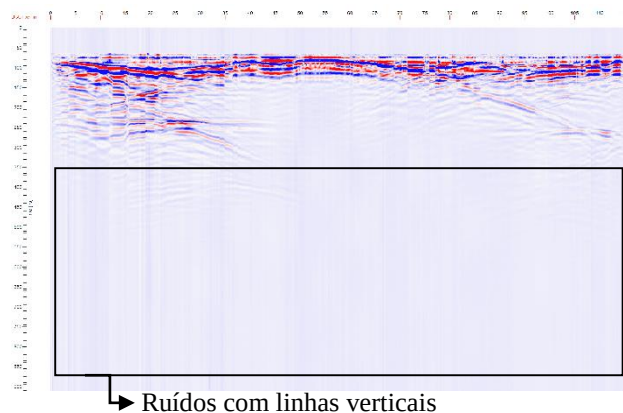


Figura 3: Background Removal

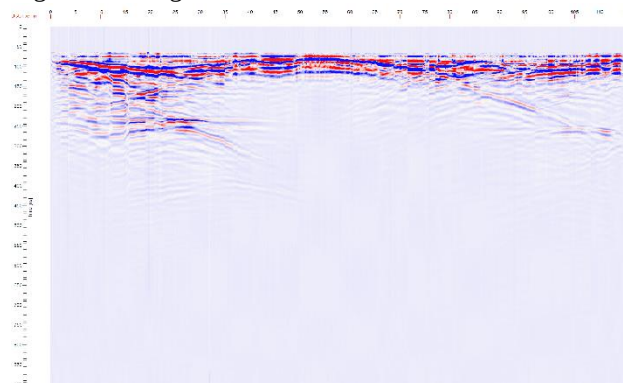


Figura 4: DC Removal

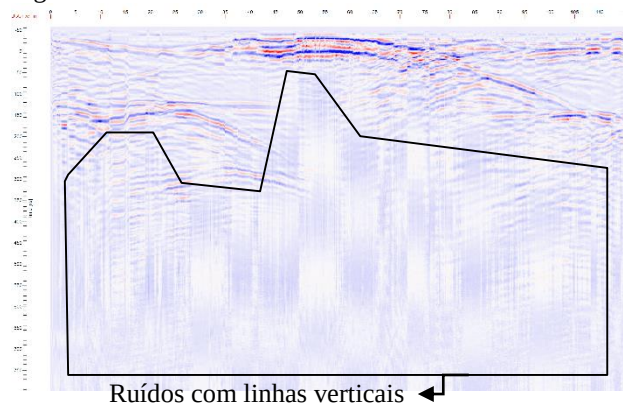


Figura 5: Amplitude Correction

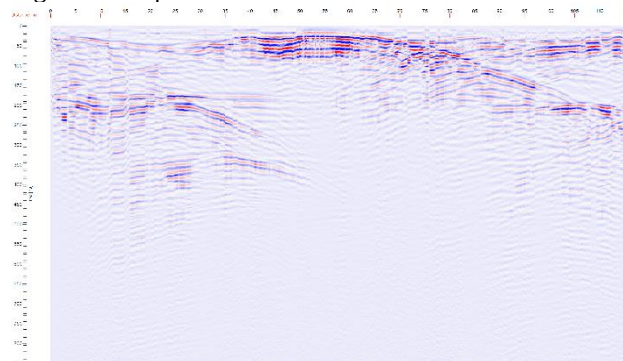


Figura 6: Processamento finalizado após aplicação do Bandpass Filtering



É possível verificar neste radargrama a presença de possíveis linhas de interface entre os materiais delineadas pelas linhas cheias e tracejadas. Observam-se ainda ruídos devido ao problema ocorrido com o odômetro durante a aquisição de dados nas direções indicadas pelas setas pretas.

Apesar do processamento da imagem minimizar os ruídos, a identificação dos materiais das camadas subsuperficiais pelo método de ajuste de hipérbole foi dificultada.

Neste processamento foram consideradas três camadas distintas: camada superior, camada intermediária e camada inferior.

Na camada superior não foi possível identificar hipérboles devido à pequena espessura da camada e a grande presença de perturbações, porém sabe-se por meio de constatações observacionais *in situ* que a primeira camada desta prospecção é constituída de neve recentemente acumulada. A estimativa das seguintes camadas foi feita por meio do método de ajuste de hipérbole.

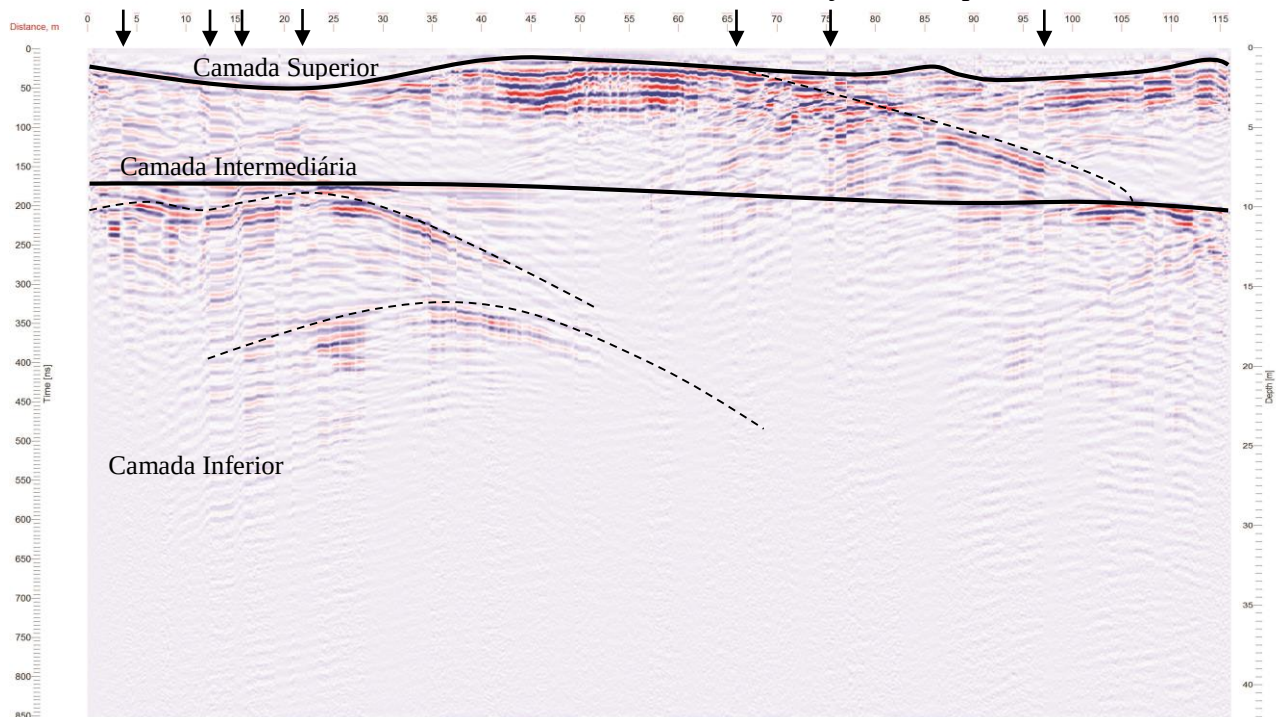


Figura 7: Interpretação das superfícies de reflexão da onda com identificação das linhas de interface entre materiais.

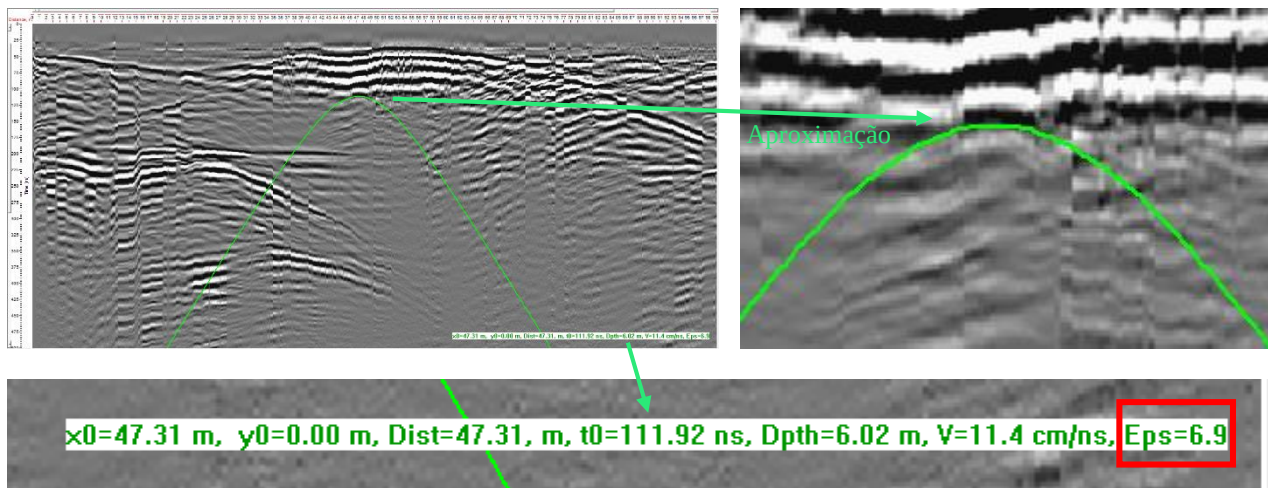
Nas Figuras 8a e 8b são apresentados os pontos onde se utilizou a técnica de ajuste de hipérbole para identificação das propriedades dielétricas dos materiais constituintes das camadas intermediária e inferior, respectivamente.

É possível observar na esquerda superior das imagens 8a e 8b o radargrama com o posicionamento das hipérboles utilizadas no ajuste de hipérbole, na direita superior das mesmas imagens um detalhe do ponto máximo da hipérbole e na região inferior das imagens são apresentados os parâmetros estimados de maneira automática pela função de ajuste de hipérbole do *software* empregado no processamento.

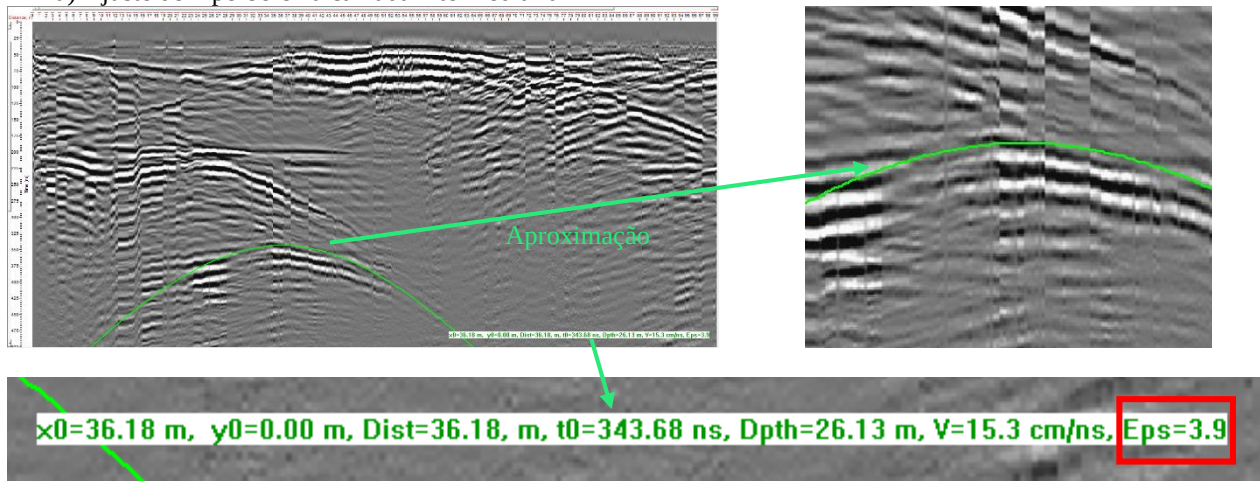
O parâmetro levado em consideração para a estimativa do material das camadas foi à

permissividade dielétrica relativa, ressaltada em um retângulo vermelho na extremidade direita inferior das Figuras 8a e 8b.

Nas Figuras 8a e 8b pode-se observar que os valores de permissividade dielétrica relativa são iguais a 6,9 e 3,9, respectivamente. De acordo com Jol (2009) e Daniels (2007) os valores da permissividade dielétrica relativa do *Permafrost* varia entre 4 e 8. Pode-se concluir, portanto, que a camada intermediária pode ser constituída deste material. Já a permissividade dielétrica relativa do gelo é igual a 3, segundo Jol (*op. cit.*), e igual a 4 conforme sugere Daniels (*op. cit.*). Portanto pode-se concluir que o valor de permissividade dielétrica relativa da camada inferior é equivalente ao valor desta propriedade do gelo. O radargrama com a interpretação final do perfil observado é apresentado na Figura 9.



a) Ajuste de hipérbole na camada intermediária



b) Ajuste de hipérbole na camada inferior

Figura 8: Determinação dos parâmetros dielétricos dos materiais de subsuperfície por meio do ajuste de hipérbole

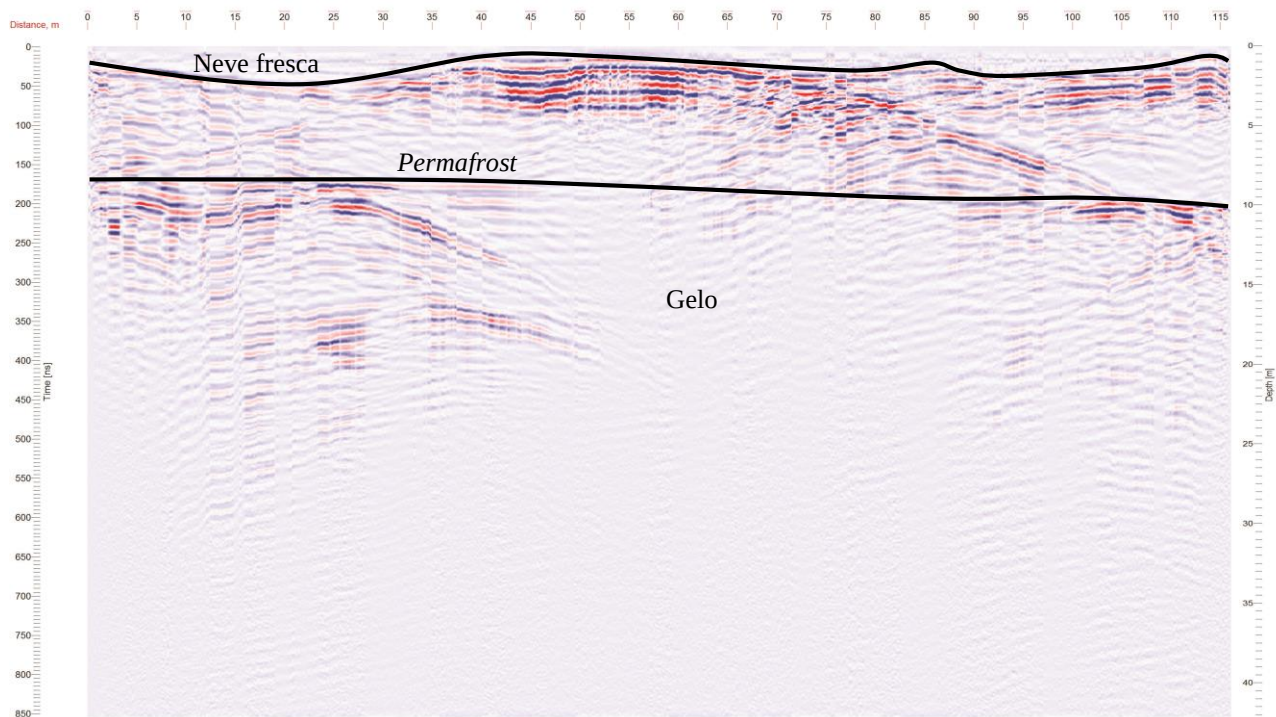


Figura 9: Radargrama interpretado

Com base no levantamento realizado ressalta-se a importância de compatibilizar o procedimento de aquisição dos dados com as condições de campo. No caso específico, a utilização de odômetro com pneu de borracha mostrou-se ineficiente na obtenção dos dados de deslocamento horizontal sobre a superfície de neve fofa. Isto resultou na dificuldade de identificação de hipérboles que auxiliassem na estimativa dos materiais constituintes das camadas subsuperficiais.

Apesar disto, foi possível distinguir a presença de três camadas de materiais distintos por meio do processo de ajuste de hipérbole. Como esperado para um Glaciar Coberto, o valor de permissividade dielétrica relativa da camada subjacente a neve recentemente depositada foi igual ao valor esperado para um *permafrost*, e o valor de permissividade dielétrica relativa da camada subjacente ao *permafrost* foi igual ao valor esperado para o gelo.

Assim sendo, sugere-se que na seção levantada o perfil seja composto por uma camada de neve fresca, diposta sobre uma camada de *permafrost*, que por sua vez, está depositada sobre uma camada de gelo.

Infelizmente, não foi possível identificar o topo do estrato rochoso que permitiria quantificar o volume de gelo existente.

Está previsto para o segundo semestre de 2016 uma nova campanha de investigação que objetivará a determinação do topo do estrato rochoso.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao projeto SWINDON “Sustainable Water Management in Developing Countries” pelo apoio financeiro. O referido projeto é parte do programa EXCEED do German Academic Exchange Service (DAAD) fomentado pelo German Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ).

## REFERÊNCIAS

- Angillieri, M. Y. E. (2009) A preliminary inventory of rock glaciers at 30°S latitude, Cordillera Frontal of San Juan, Argentina. *Quaternary International*, ELSEVIER, Vol. 195, p.151-157.
- Clapperton, C. M. (1983) The glaciation of the andes. *Quaternary Science Reviews*, GREAT BRITAIN, Vol. 2, p. 83-155.
- Daniels, D. J. (2004). *Ground Penetrating Radar*. 2ed. London: THE INSTITUTE OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY, 726p.
- Forte, E.; Dossi, M.; Colucci, R. R.; Pipan, M. (2013) A new fast methodology to estimate the density of frozen materials by means of common offset GPR data. *Applied Geophysics*, ELSEVIER, Vol 99, p. 135-145.
- Godio, A.; Rege, R. B. (2015) The mechanical properties of snow and ice of an alpine glacier inferred by integrating seismic and GPR methods, *Journal of Applied Geophysics*, ELSEVIER, Vol. 115, p. 92-99.
- Janke, J. R.; Bellisario, A. C.; Ferrando, F. A. (2015) Classification of debris-covered glaciers and rock glaciers in the Andes of central Chile, *Geomorphology*, ELSEVIER, Vol. 241, p. 98-121.
- Janke, J.; Regmi, N.; Giardino, J.; Vitek, J. (2013) Rock glaciers. In: SHRODER, J. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*. ELSEVIER, pp. 238-273.
- Jol, H. M. (2009). *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. ELSEVIER, 524p.
- Khan, U. S. (2011) Interpretation of Ground Penetrating Radar Data for Utilities. VDM, 200P.
- Leiva, J. C. (1999) Recent Fluctuations of the Argentinian Glaciers. *Global and Planetary Change*, ELSEVIER, Vol. 22, p. 169-177.
- Maas, C. e Schmalzl, J. (2013). Using pattern recognition to automatically localize reflection hyperbolas in data from ground penetrating radar, *Computers & Geoscience*, ELSEVIER, Vol. 58, p. 116-125.
- Masiokas, M. H.; Rivera, A.; Espizua, L. E.; Villalba, R.; Delgado, S.; Aravena, J. C. (2009) Glacier fluctuations in extratropical South America during the past 1000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, ELSEVIER, Vol. 281, p. 242-268.
- Previali, M.; Godio, A.; Ferraris, S. (2011) Validation of spatial variability of snowpack thickness and density obtained with GPR and TDR methods. *Journal of Applied Geophysics*, ELSEVIER, Vol. 75, p. 284-29