

Ice thickness surveys of the Southern Patagonian Ice Field using a low frequency ice penetrating radar system (Mediciones de espesor de hielo con un sistema de radar de baja frecuencia en Campo de Hielo Sur)

Rodrigo Zamora, José Uribe, *Member, IEEE*, Jonathan Oberreuter and Andrés Rivera

Abstract—An airborne low frequency radar system used to survey the ice thickness of the northern part of the Southern Patagonian Ice Field (SPI) is presented. The radar is an impulse system operating at a central frequency of 20 MHz. The system is controlled and operated from a helicopter cabin connected with an optical fibre cable to the antennas that are fixed to an aluminium structure weighting 350 kg that is hanging 40-50 m below the helicopter. At the antenna, there is a high-power transmitter working at a 5 kHz PRF, and a radar receiver. Also, there is a dual frequency GPS for the real-time positioning of the measurements. The survey took place in August 2015 and October 2016 while flying more than 400 kilometres of Glaciares Jorge Montt, OHiggins and the high plateau of the SPI. The system performance was adequate to survey most of the ice thicknesses, including the steep slopes and inaccessible crevassed areas. The maximum ice thickness penetration yielded 581 m of temperate ice. Several bottom reflections were obscure by englacial water and/or surface crevasses.

Index Terms—glacier thickness, temperate ice, radar, airborne.

I. INTRODUCCIÓN

Campo de Hielo Sur (CHS) es una masa de hielo de casi 13000 km^2 de superficie donde existen pocos datos de espesor de hielo, por lo que no se conoce el volumen total de hielo allí existente. El difícil acceso, desde el punto de vista logístico, las condiciones meteorológicas y las características térmicas y dinámicas del hielo limitan el uso de sistemas de medición tradicionales como radio eco sondaje (RES), sísmica, gravimetría o exploración directa (excavación) [1]. El espesor de hielo de un glaciar corresponde a la distancia vertical entre la superficie del hielo y el fondo rocoso del glaciar [2]. Para su medición se requiere entre otros factores, considerar la temperatura del hielo, puesto que cuando ésta se encuentra muy por debajo el punto de fusión, su conductividad y permitividad dieléctrica disminuyen, aumentando la velocidad de propagación de la señal electromagnética, lo que permite el uso de sistemas de radar. Las pérdidas de señal son despreciables para frecuencias menores a 100 MHz [3] en hielo frío. Sin embargo, cuando la temperatura del hielo se acerca al punto de fusión, la cantidad de discontinuidades en el hielo aumenta, las pérdidas por dispersión también aumentan y el contraste entre propiedades dieléctricas se reduce, limitando

la capacidad de detección del fondo rocoso. En CHS, el hielo tiene una temperatura cercana al punto de fusión, lo que implica que hay agua en contacto con hielo a nivel supra, intra y subglacial, siendo esta el principal obstáculo de la propagación de las ondas de radar. Estos cuerpos de agua producen fuerte dispersión y atenuación de las ondas electromagnéticas, lo que reduce la capacidad de detección del fondo rocoso [4]. Teóricamente, las ondas electromagnéticas tienen la posibilidad de penetrar hielo temperado a frecuencias menores a 35 MHz [5]. Mediciones terrestres previas en Patagonia como Raymond et. al ([6]) lograron medir un espesor máximo de 740 m en el Glaciar Tyndall, mientras que Rivera y Casassa ([7]) midieron un máximo de 750 m en el Paso Cuatro Glaciares. A pesar de estos resultados, los sistemas de radar terrestres han demostrado no ser prácticos para medir extensas regiones englaciadas, en especial por la topografía de CHS. En la última década se han probado sistemas de radar aerotransportados en Patagonia donde sólo los de baja frecuencia (< 30 MHz) han obtenido datos de fondo como el máximo medido en el Glaciar Tyndall de 670 m [8] y 700 m en el Glaciar Colonia y Nef ([9] [10]).

En este trabajo se presentan las mediciones de espesor de hielo realizadas en agosto de 2015 y octubre de 2016 en el CHS, donde se realizaron 440 km de mediciones continuas utilizando un sistema de radar aerotransportado de 20 MHz. El área de estudio se centra en la denominada Meseta Norte de CHS, entre los 48° S y 49° S, y entre las costas del Pacífico y el Lago OHiggins (Fig. 1). A continuación, se detallan las características del radar utilizado, las distintas etapas del procesamiento de los datos y los resultados obtenidos en los distintos perfiles.

II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El RES es un método de prospección geofísica no invasiva del hielo. Consiste en el uso de un sistema que genera un pulso electromagnético de corta duración (< 10 ns), de gran amplitud (> 1 kV) y de banda ancha, generalmente utilizando una frecuencia central que puede estar comprendida entre 1 a 50 MHz ([11]). Este pulso es generado por un transmisor de impulso de alto voltaje. Para las mediciones en el CHS se utilizó un radar de tipo impulso, con una frecuencia central de transmisión de 20 MHz, con lo cual se obtiene una resolución teórica vertical de 4 m para hielo temperado. Las antenas utilizadas son del tipo bow-tie, las cuales son transportadas por un helicóptero en una estructura de metal como carga colgante.

R. Zamora, J. Uribe and J. Oberreuter are with the Laboratorio de Glaciología, Centro de Estudios Científicos (CECs), Valdivia, Chile (e-mail: rzamora@cecs.cl).

A. Rivera is with the Laboratorio de Glaciología, Centro de Estudios Científicos (CECs), Valdivia, Chile and also with the Departamento de Geografía, Universidad de Chile, Santiago, Chile

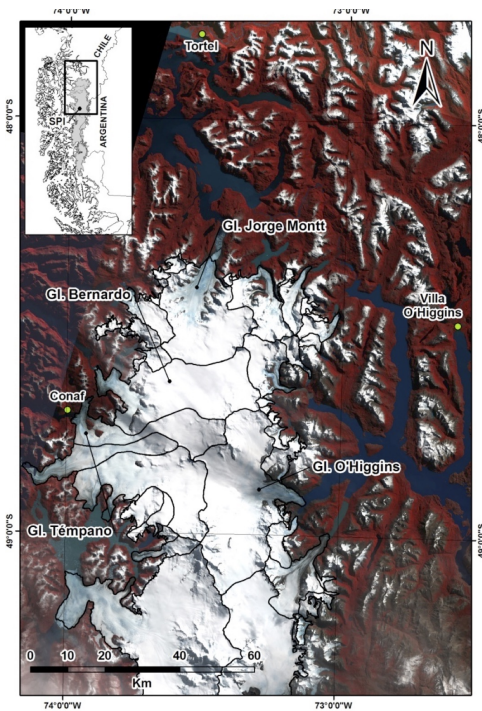


Fig. 1. Area de estudio correspondiente a de la parte norte de Campo de Hielo Sur (la imagen de fondo corresponde a Landsat 8 del 14 de enero de 2015). Las líneas negras indican las principales cuencas glaciares.

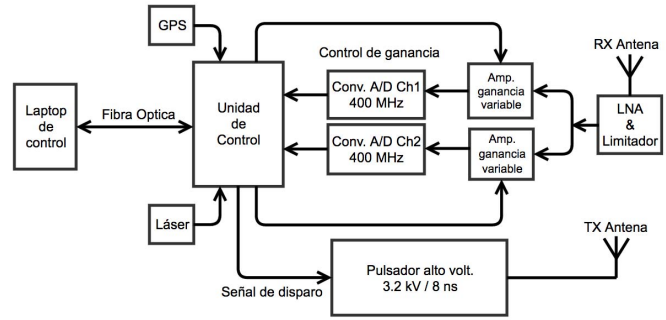


Fig. 3. Diagrama en bloque del sistema de radar.

Fast Ethernet (MOXA IMC-21). Para la corrección de la posición se utiliza una estación base GPS geodésica en tierra, obteniéndose así la georreferenciación de cada traza. En la Fig. 3 se presenta un diagrama de bloques del sistema de radar.

A. Transmisor

En la estructura metálica que soporta las antenas se instala un transmisor que genera un impulso de 3200 V y 8 ns de tiempo de subida, a una frecuencia de repetición de 3 kHz (Pulse Repeticin Rate, PRF) [9].

B. Receptor

El receptor consta de una unidad digital de control y un amplificador de radio frecuencia (RF). La unidad de control digital es un sistema de adquisición multicanal no sólo limitado a un radar de impulso, ya que también puede ser configurado como un sistema de radar de compresión de pulso, un FM-CW (Frecuencia Modulada en Onda Continua) o un sistema personalizado. La unidad de control digital (Fig. 4) está basada en Xilinx Virtex 6 FPGA (Field Programmable Gate Array) y tiene dos conversores análogo/digital (ADC) de alta velocidad ADS5474 (TI). Consta de dos canales, uno de baja y otro de alta ganancia, para aumentar el rango dinámico de recepción del sistema. Cada canal es digitalizado por dos convertidores análogo/digital de 14 bits de resolución a una frecuencia de muestreo de 400 MSPS (Mega Sampling Per Seconds) y un promedio de 256 trazas. Dispone de un GPS integrado para la georreferenciación de cada traza con una tasa de captura de 1 Hz y un generador de señal de 1 GHz utilizando una síntesis directa digital (Direct Digital Synthesis, DDS) y un ADC auxiliar a 80 MSPS/16 bits. Las señales transferidas y de control de datos se realizan mediante un enlace de comunicación Fast Ethernet. El digitalizador genera la señal de activación para el transmisor, tiene dos puertos seriales, uno para el altímetro láser y otro para la señal de control del amplificador de RF. El promedio máximo es de 32768 trazas y una longitud máxima de 32768 muestras por trazas.

El amplificador de RF análogo comprende dos etapas, la primera es un amplificador de bajo ruido (Low Noise Amplifier, LNA) cerca de la antena receptora con una ganancia de 21.7 dB y una figura de ruido de 2.7 dB. Esta etapa también tiene un limitador de diodos PIN y un filtro pasa bajo con fase

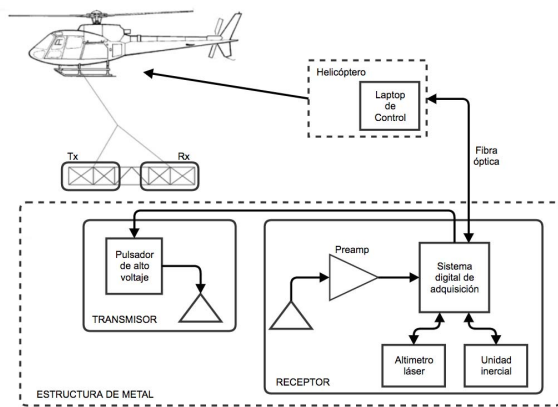


Fig. 2. Diagrama en bloque del sistema de radar aerotransportado.

El tamaño de esta estructura es de 4,8 m de ancho por 8 m de largo y 1,2 m de alto, con una masa de aproximadamente 350 kg. La estructura es transportada 20 m bajo el helicóptero, a una velocidad de medición de 40 nudos, y a una altura que va entre 40 y 60 m sobre la superficie del glaciar (Fig. 2) [10].

La electrónica del radar es montada en la estructura metálica, incluyendo un altímetro láser, que indica la altura entre las antenas del radar y la superficie del glaciar y un receptor GPS geodésico para la georreferenciación. A bordo del helicóptero se utiliza un computador para el control y adquisición de los datos de radar y otro de navegación. La comunicación entre el radar y la cabina del helicóptero se realiza mediante fibra óptica, utilizando dos convertidores

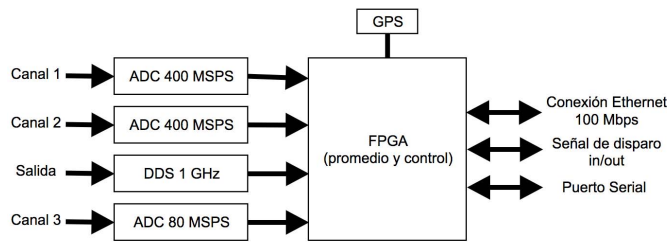


Fig. 4. Diagrama en bloque del sistema digital de control.

lineal en la entrada del LNA. El limitador evita una potencia excesiva en la entrada del LNA. La segunda etapa consiste en dos vías, una de baja y otra de alta ganancia. La figura de ruido total del sistema es de 4.5 dB y la ganancia total del canal de alta ganancia es entre 30 a 60 dB. El canal de baja ganancia tiene un rango entre -16 a 14 dB. El receptor funciona a 20 MHz de ancho de banda, promediando 256 trazas. El nivel de ruido real del convertidor analógico es de -59 dBm y la señal mínima detectable teórica (Minimum Detectable Signal, MDS) es de -115.58 dBm. Para estas mediciones, la unidad digital se configuró en 8192 muestras por traza, 256 promedios de trazas y 3 kHz de PRF; por lo tanto, se obtuvo una traza cada 2 m aproximadamente a lo largo de la trayectoria medida.

C. Adquisición y procesamiento de datos

La interfaz gráfica (Graphics User Interface, GUI) permite configurar, controlar y monitorear en línea los parámetros del radar (GPS del navegador, enlace de datos, temperatura de la placa del circuito impreso del radar, voltaje de las baterías del radar y el espacio libre restante en el disco duro). Adicionalmente muestra la señal y el radargrama de cada canal (alta y baja ganancia) en tiempo real. La aplicación además despliega el número de trazas capturadas y la altitud de la antena sobre la superficie del glaciar. Los datos sin procesar se convierten en un formato de punto flotante de 32 bits de doble precisión. Para el procesamiento de los datos se usó el software REFLEXw (sandmeier-geo.de) aplicando un filtro de substracción dewow, filtro butterworth pasa banda entre 10 y 30 MHz, background removal, migración de 2D para enfocar la energía difractada al punto reflector central, ajuste de la curva de ganancia (Energy Decay) para visualizar mejor los retornos a mayor profundidad, entre otros. Las reflexiones procedentes del helicóptero se eliminaron mediante una corrección estática [12].

III. RESULTADOS

Durante las mediciones realizadas en CHS, las antenas del radar se volaron a aproximadamente 50 m (no siempre constante) por encima de la superficie del glaciar, y la velocidad media del helicóptero fue de 40 nudos. En la Fig. 5 se presentan todos los perfiles medidos en el sector norte de CHS. Estos corresponden a los perfiles longitudinales L1L43, L36L38, L56L57 y a siete perfiles transversales (L2L3, L4L5, L19L20, L21L22, L23L24, L29L30, L39L40, L41L42). Además, se presenta, en escala de colores, el espesor de hielo interpretado después del procesamiento en cada uno de los

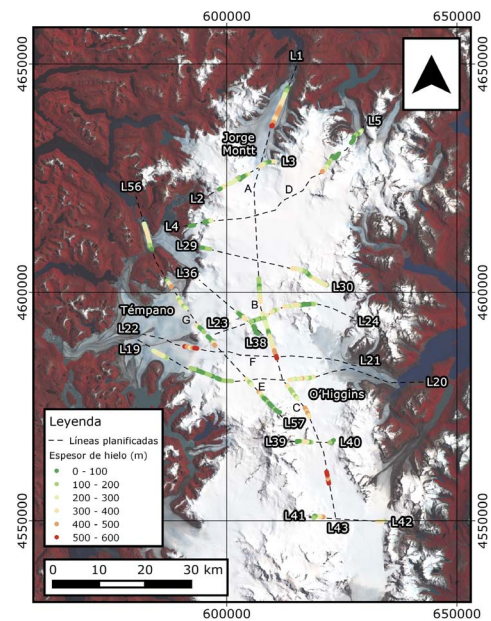


Fig. 5. Perfiles longitudinales y transversales con interpretación del espesor de hielo (en escala de colores). (la imagen de fondo corresponde a Landsat 8 del 14 de enero de 2015, proyección UTM, Zona 18S, Datum WGS84).

perfiles medidos con el radar aerotransportado de 20 MHz, donde el color verde indica menor espesor de hielo, y el color rojo un valor máximo. La distancia total medida sobre el sector norte de CHS corresponde a 440 km lineales (líneas segmentadas). El perfil L1L43 muestra la zona de mayor espesor con un valor máximo de 581 m y un espesor promedio de 219 m.

El espesor de hielo interpretado corresponde a la interfaz hielo-roca, siendo el fondo del glaciar generalmente el reflector de mayor intensidad y ms profundo. Durante la interpretación del reflector de fondo, se ha cuidado en ir descartando retornos laterales (reflectores producidos por montañas laterales principalmente) o reflectores producidos por características propias del radar. También, los cruces entre perfiles se han usado como guía durante el proceso de interpretación del fondo subglacial.

A. Radargrama perfil longitudinal L56-G

La Fig. 6 se presenta el radargrama medido del perfil longitudinal L56-G. En la parte superior de esta figura, se muestra el radargrama migrado de este perfil sin interpretación del fondo. En la parte inferior, la línea de color rojo muestra la interpretación del fondo rocoso.

El espesor máximo detectado es de 470 m, con un espesor promedio de 209 m. La distancia total de este perfil es de 30 km.

B. Radargrama perfil longitudinal L1-L43

El radargrama correspondiente al perfil longitudinal L1-L43 se dividió en cuatro tramos debido a su longitud. En la Fig. 7 se presenta el radargrama correspondiente al tercer tramo, B-C. Las líneas verticales amarillas representan las intersecciones con los perfiles transversales L23-L24, L21-L22, L19-L20.

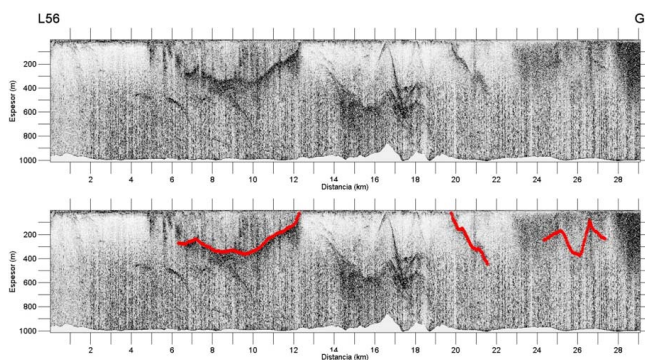


Fig. 6. Radargrama perfil transversal L56-G correspondiente a la zona baja del glaciar (Fig. 5).

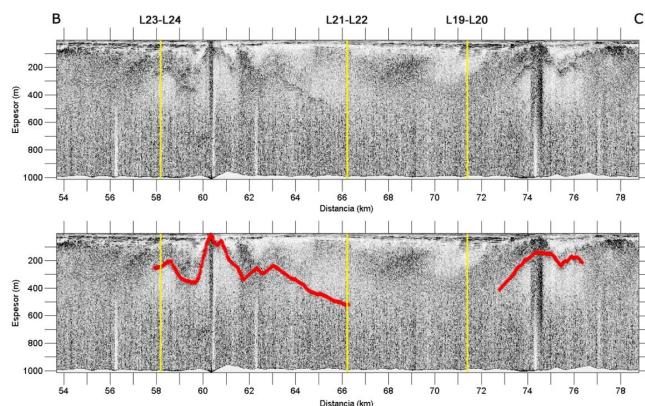


Fig. 7. Radargrama correspondiente al tramo B-C del perfil longitudinal L1-L43 (Fig. 5).

En la parte superior de esta figura, se muestra el radargrama migrado de este perfil sin interpretación del fondo. En la parte inferior, se observa la interpretación del fondo rocoso en línea roja. El espesor máximo detectado es de 581 m con un espesor promedio es de 297 m. La distancia total de este perfil es de 25 km. En ambas figuras las zonas sin interpretación del fondo rocoso corresponden a zonas con gran cantidad de grietas en la superficie, lo que produce una excesiva dispersión de la señal o la presencia de cuerpos de agua a distintas profundidades lo que atenúa la señal electromagnética.

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El sistema de radar aerotransportado aquí presentado es una herramienta adecuada para la medición de hielo temperado en el CHS. Se logró medir espesores de hielo a pesar de la atenuación y dispersión de las señales electromagnéticas generadas por la presencia de aguas y grietas en el hielo. De los 440 km lineales volados, fue posible interpretar espesores en 132 km, lo que equivale a un 30% de la distancia total recorrida. El espesor máximo registrado es de 581 m el cual fue medido en el corredor Hicken, localizado entre los glaciares OHiggins y Viedma. El espesor promedio medido en la totalidad de los perfiles es de 219 m con una desviación estándar de 126 m. El rendimiento del sistema mejoró respecto a mediciones aerotransportadas previas [8] gracias a una mayor directividad de la antena utilizada, lo que redujo las reflexiones

laterales. Desde el punto de vista estrictamente operacional, el sistema aquí descrito también experimentó mejoras, debido a que se pudo medir en sectores con topografía, sin las limitaciones experimentadas por ejemplo, durante vuelos con aviones realizados previamente en el glaciar Tyndall [8]. Se espera incorporar a futuro una Unidad de Medición Inercial (IMU en inglés) instalada en la estructura metálica, lo que permitiría mejorar el procesamiento de datos gracias a la corrección de la inclinación de la estructura durante los levantamientos aerotransportados. Se espera además incorporar a futuro un radar de mayor frecuencia (200-400 MHz) que se instalaría en la misma estructura de la antena, con el fin de realizar mediciones simultáneas de espesores someros de nieve/neviza con alta resolución.

ACKNOWLEDGMENT

El Centro de Estudios Científicos (CECs) es financiado por el programa de financiamiento basal de CONICYT. El presente trabajo es parte del proyecto FONDECYT Regular N°1171832.

REFERENCES

- [1] I. Grtner-Roer, K. Naegeli, M. Huss, T. Knecht, H. Machguth, and M. Zemp, A database of worldwide glacier thickness observations, *Glob. Planet. Change*, vol. 122, pp. 330344, Nov. 2014.
- [2] J. G. Cogley, R. Hock, L. A. Rasmussen, A. A. Arendt, A. Bauder, R. J. Braithwaite, P. Jansson, G. Kaser, M. Mller, L. Nicholson, and M. Zemp, *Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms*, vol. 86. Paris: IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86, IACS Contribution No. 2, UNESCO-IHP, 2011.
- [3] S. A. Arcone and A. J. Delaney, Field dielectric measurements of frozen silt using VHF pulses, *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 2937, 1984.
- [4] H. M. Jol, *Ground penetrating radar: theory and applications*, First. Elsevier, 2009.
- [5] R. D. Watts and A. W. England, Radio echo sounding of temperate glaciers, ice properties and sounder design criteria, *J. Glaciol.*, vol. 17, no. 75, 1976.
- [6] C. Raymond, T. a. Neumann, E. Rignot, K. Echelmeyer, A. Rivera, and G. Casassa, Retreat of Glaciar Tyndall, Patagonia, over the last half-century, *J. Glaciol.*, vol. 51, no. 173, pp. 239247, 2005.
- [7] A. Rivera and G. Casassa, Ice Thickness Measurements on the Southern Patagonian Icefield, in *The Patagonian Icefields. A unique natural laboratory for environmental and climate change studies.*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2002.
- [8] R. Zamora, D. Ulloa, G. Garcia, R. Mella, J. Uribe, J. Wendt, A. Rivera, G. Gacita, and G. Casassa, Airborne radar sounder for temperate ice: Initial results from Patagonia, *J. Glaciol.*, vol. 55, no. 191, pp. 507512, 2009.
- [9] N. Blindow, C. Salat, V. Gundelach, U. Buschmann, and W. Kahnt, Performance and calibration of the helicopter GPR system BGR-P30, 2011 6th Int. Work. Adv. Gr. Penetrating Radar, IWAGPR 2011, pp. 04, 2011.
- [10] N. Blindow, C. Salat, and G. Casassa, Airborne GPR sounding of deep temperate glaciers - examples from the Northern Patagonian Icefield, 2012 14th Int. Conf. Gr. Penetrating Radar, pp. 664669, 2012.
- [11] L. a. Plewes and B. Hubbard, A review of the use of radio-echo sounding in glaciology, *Prog. Phys. Geogr.*, vol. 25, no. 2, pp. 203236, 2001.
- [12] J. Oberreuter, J. Uribe, R. Zamora, G. Gacita, and A. Rivera, Mediciones de espesor de hielo en Chile usando radio-echo sondaje, *Geoacta*, vol. 39, no. 1, pp. 108122, 2014.