



**UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL EN INFORMATICA**

“Desarrollo de un sistema de adquisición y procesamiento de datos de radar para mediciones de espesor de hielo”

Tesis para optar al título de

Ingeniero Civil en Informática

Profesor Patrocinante:
Gino Casassa Rogazinski

Profesores Copatrocinantes:
María Eliana de la Maza Werner
Rodrigo Zamora Maric

Ronald Andrés Mella Pineda
VALDIVIA - CHILE
2005

VALDIVIA, 12 de Septiembre de 2005

DE : Gino Casassa

A : DIRECTORA ESCUELA INGENIERÍA CIVIL EN INFORMÁTICA

MOTIVO:

INFORME TRABAJO DE TITULACIÓN

Nombre Trabajo de Titulación: "Desarrollo de un sistema de adquisición y procesamiento de datos de radar para mediciones de espesor de hielo"

Nombre del Alumno : Ronald Mella

Nota : 6,8
(en números)

Seis coma ocho
(en letras)

FUNDAMENTO DE LA NOTA:

Considerar :
Cumplimiento del objetivo propuesto
Satisfacción de alguna necesidad
Aplicación del método científico
Interpretación de los datos y obtención de conclusiones
Originalidad
Aplicación de criterios de análisis y diseño
Perspectivas del trabajo
Coherencia y rigurosidad lógica
Precisión del lenguaje técnico en la exposición, composición, redacción e ilustración.



Gino Casassa

Valdivia, 13 de septiembre de 2005

DE : Prof. María Eliana de la Maza W.
Instituto de Informática

A : Sra. Miguelina Vega R.
Directora Escuela de Ingeniería Civil en Informática

MOTIVO : Informar revisión y calificación del Proyecto de Título "Desarrollo de un Sistema de Adquisición y Procesamiento de Datos de Radar para Mediciones de Espesor de Hielo", presentado por el alumno Ronald Andrés Mella Pineda, que refleja lo siguiente:

Se logró el objetivo planteado de desarrollar un sistema de adquisición y procesamiento de datos de radar. Este sistema debería minimizar el tiempo de procesamiento de los datos, permitiendo extraer importante información de los mismos.

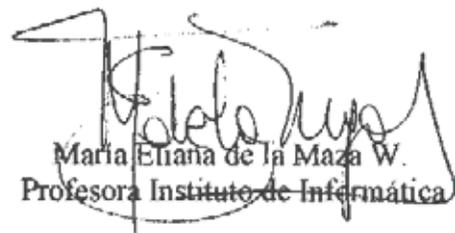
Se presenta, en el documento, información precisa sobre glaciares, métodos utilizados para medir su espesor, radares, GPS; lo anterior facilita entender claramente el trabajo desarrollado.

El hecho que los resultados del sistema hayan sido comparados con otros mediciones, resultando similares y que además se hayan enviado a conferencias y publicaciones, valida su funcionamiento y utilidad.

En el documento se aprecia la aplicación de criterios adecuados de análisis y diseño, además, de una precisión en la redacción y en el lenguaje técnico utilizado.

Por lo anteriormente expuesto, y además en mi calidad de copatrocinante, por conocer el trabajo realizado por el alumno, califico la tesis presentada con nota siete (7,0).

Con este particular, saluda arte, a Ud.,



María Eliana de la Maza W.
Profesora Instituto de Informática

Gracias a mis padres, abuelita y hermanos.

INDICE

RESUMEN.....	3
SUMMARY	4
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	5
1.1 CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL Y EL ROL DE LOS GLACIARES	5
1.2 ENFOQUE GENERAL DEL PROBLEMA	6
1.3 IMPORTANCIA Y NATURALEZA DEL ESTUDIO	8
1.4 OBJETIVOS	9
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	9
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	9
CAPÍTULO 2. SISTEMA DE RADAR PARA GLACIARES Y GPS ACTUALMENTE EN USO..	10
2.1 INTRODUCCIÓN.....	10
2.2 GLACIARES.....	10
2.2.1 <i>Tipos de glaciares</i>	11
2.2.2 <i>Importancia del estudio de glaciares</i>	12
2.3 MÉTODOS UTILIZADOS PARA MEDICIÓN DE ESPESOR DE LOS GLACIARES.....	12
2.4 MÉTODO DE RADIO ECO SONDAJE (RES).....	13
2.4.1 <i>Dispositivos que intervienen en el sistema de RES</i>	14
2.5 CÁLCULO DE ESPESOR	17
2.6 SELECCIÓN DEL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN Y DEL ENTORNO DE DESARROLLO.....	19
2.7 GPS.....	20
2.7.1 <i>Principios de funcionamiento del sistema GPS</i>	21
2.7.2 <i>Modos de operación de GPS</i>	22
2.7.3 <i>Posicionamiento simple y diferencial</i>	22
2.7.4 <i>Receptores</i>	23
2.7.5 <i>Sistemas de referencia</i>	25
2.7.6 <i>Proceso de interpolación</i>	26
2.8 CONCLUSIONES	29
CAPÍTULO 3: PROCESAMIENTO DE IMÁGENES.....	30
3.1. INTRODUCCIÓN.....	30
3.2 IMÁGENES DIGITALES	31
3.3 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES	33
3.4 MODIFICACIÓN DEL CONTRASTE	33
3.4.1 <i>Estiramiento del contraste</i>	35
3.4.2 <i>Desplazamiento del contraste</i>	36
3.5 SUAVIZADO DE IMAGEN.....	39
3.6 DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE LA TOPOGRAFÍA SUBGLACIAR	39
3.7 CONCLUSIONES	41
CAPÍTULO 4. SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y SELECCIÓN DEL FORMATO DE ADQUISICIÓN	42
4.1 INTRODUCCIÓN.....	42
4.2 FORMATOS DE ADQUISICIÓN.....	43
4.3 DESPLIEGUE DE DATOS.....	45
4.3.1 <i>Formato amplitud</i>	46
4.3.2 <i>Formato raster</i>	46
4.4 SELECCIÓN DEL FORMATO DE ADQUISICIÓN	50
4.5 SISTEMA DE ADQUISICIÓN	57
4.5.1 <i>Sistema de adquisición bajo Windows</i>	58
4.6 CONCLUSIONES	61
CAPÍTULO 5. APLICACIÓN DE PROCESAMIENTO (ECORAMP V1.0)	62
5.1 INTRODUCCIÓN.....	62
5.2 DISEÑO DE LA APLICACIÓN.....	63
5.2.1 <i>Despliegue de datos</i>	67
5.2.2 <i>Procesamiento de imagen raster</i>	67
5.2.3 <i>Integración de los datos GPS</i>	69
5.3 PRESENTACIÓN DE LA APLICACIÓN DE PROCESAMIENTO ECORAMP V1.0	70

5.3.1 Interfaz principal de ECORAMP v1.0	70
5.3.2 Despliegue de datos en ECORAMP V1.0	73
5.3.2.1 Despliegue en formato amplitud	73
5.3.2.2 Despliegue en formato raster	74
5.3.3 Procesamiento de imagen raster	75
5.3.4 Cálculo de espesor.....	77
5.3.4.1 Dibujo de la topografía subglaciar	77
3.5 Cálculo de espesor en formato amplitud	80
5.3.6 Cálculo de espesor en formato raster	80
5.3.7 Integración de los datos GPS	83
5.3.8 Cálculo de errores	84
5.4 CONCLUSIONES	86
CAPÍTULO 6. VALIDACIÓN DE LOS DATOS, CONCLUSIONES Y DESARROLLOS	
FUTUROS.....	87
6.1 INTRODUCCIÓN.....	87
6.2 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LA APLICACIÓN ECORAMP V1.0	87
6.3 CONCLUSIONES GENERALES	90
6.4 DESARROLLOS FUTUROS	92
REFERENCIAS	93
ANEXO I. COMANDOS UTILIZADOS PARA EL CONTROL DEL OSCILOSCOPIO	
TEKTRONIX THS730A.....	95
ANEXO II: ALGORITMOS IMPLEMENTADOS	104

RESUMEN

El estudio de los glaciares es vital en la investigación del cambio climático global y sus complejas interacciones. Uno de los parámetros claves en el estudio de los glaciares es la determinación del espesor de hielo. El método de radar, o radio-eco sondaje (RES) es el más utilizado actualmente para la medición de espesor del hielo.

Considerando las condiciones en las que se debe trabajar en los glaciares con el sistema de RES, a veces a varios miles de metros sobre el nivel del mar y en condiciones meteorológicas adversas, resulta indispensable tener un sistema de RES óptimo y eficiente en sus etapas de adquisición y procesamiento de datos, idealmente en tiempo real. El sistema de RES existente en el Laboratorio de Glaciología y Cambio Climático del Centro de Estudios Científicos (LGCC-CECS) es limitado en la entrega de información en tiempo real y su etapa de post-procesamiento resulta ser muy larga y engorrosa.

En la presente tesis se desarrolla un sistema de adquisición y procesamiento de datos de radar. El sistema de adquisición entrega información en tiempo real referente al estado de las señales, la estructura interna del glaciar y la topografía subglaciar. Estos datos obtenidos en terreno, simultáneamente con los datos GPS, son procesados en la aplicación de procesamiento de datos de radar (EcoRamp v1.0). Esta aplicación agrega utilidades que permiten un trabajo más detallado de los datos, sin realizar modificaciones previas de los archivos de radar y reduciendo la cantidad de etapas presentes en el método antiguo. Con esto se obtiene como resultado final los espesores de los perfiles georeferenciados.

SUMMARY

The glaciers study is vital in the investigation of the global climatic change and its complex interactions. One of the key parameters in the glaciers study is the determination of ice thickness. The radar method or radio echo sounding (RES) is the most used at present for the measurement of ice thickness.

Considering the conditions into which field work with the RES system is carried out in glaciers, sometimes several thousands of meters above sea level and under inclement meteorological conditions, it turns out indispensable to have an optimal and efficient RES system in the stages of acquisition and data processing, ideally in real time. The existing RES at Laboratory of Glaciology and Climatic Change of Centro de Estudios Científicos (LGCC-CECS) is limited in the delivery of information in real time and post-processing stage turns out to be very long and intricate.

In this thesis an acquisition and data processing radar system is developed. The acquisition system gives information in real time regarding the state of signals, the internal structure of the glacier and the subglacial topography. These collected radar field data, simultaneously with GPS field data, are processed by applying EcoRamp v1.0 software. This application adds utilities that allow a more detailed work when processing the data, without making previous modifications of radar files and reducing the amount of stages within the old method. With the above, as a final result georeferenced profiles thicknesses are obtained.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Cambio climático global y el rol de los glaciares

La tierra esta experimentando una calentamiento generalizado con un promedio, para todo el planeta, de 0,6° C durante el último siglo [IPCC2001]. Una serie de observaciones respalda esta conclusión y ofrece una clara perspectiva sobre la rapidez de esos cambios y su evolución futura [IPCC 2001].

Para poder comprender el cambio climático global y sus efectos se debe primero comprender sus componentes y los mecanismos de operación de éstos. El clima está regulado por complejas interacciones entre la atmósfera, los océanos, la biosfera, la geosfera (suelos, sedimentos y rocas) y la criósfera (nieve y hielo marino y terrestre incluyendo glaciares).

La Tierra recibe energía del Sol en forma de radiación en un amplio espectro de frecuencias, desde los rayos gama hasta las radiofrecuencias. La superficie terrestre recibe radiación ultravioleta (UV), radiación visible e infrarroja y a su vez emite radiación infrarroja termal. Estos dos grandes flujos energéticos, radiación incidente y radiación emitida, deben estar en balance. La atmósfera afecta la naturaleza de este balance. Por ejemplo los gases de efecto invernadero (GEI) permiten que la radiación de onda corta solar penetre sin impedimento pero absorben la mayor parte de la emisión de ondas largas terrestres. Este efecto es conocido como "Efecto Invernadero"[IPCC 2001]. Resultados de diversos modelos de circulación global (GCM) indican que el aumento antropogénico de gases de efecto invernadero ha influido de manera importante en el calentamiento observado de 0,6° C en los últimos 100 años en la Tierra.

Las regiones cubiertas por nieve o hielo sobre tierra o mar (incluye la Antártica, el Océano Ártico, Groenlandia, el Norte de Canadá, el Norte de Siberia y la mayor parte

de las cimas más altas de las cadenas montañosas) juegan un rol muy importante en la regulación del clima global.

La alta capacidad de la nieve y el hielo de reflejar la radiación solar incidente produce una fuerte reducción de absorción de energía y consecuentemente mantiene una temperatura atmosférica más baja.

La masa de hielo contenida en los glaciares afecta marcadamente el volumen de los océanos y de los niveles globales del mar. Cambios en el balance de masa de los glaciares, pueden afectar grandes extensiones de zonas costeras en el mundo.

Del estudio de los glaciares se puede obtener información clave sobre el clima pasado de la Tierra desde siglos y hasta milenios antes del presente a través del estudio de testigos de hielo. Algunos de los parámetros que se han podido reconstruir incluyen temperatura, acumulación de nieve, origen de la precipitación, composición química y biológica de la nieve y el hielo, composición del aire presente en la atmósfera al momento de la precipitación.

1.2 Enfoque general del problema

Un parámetro básico en los estudios glaciológicos es la determinación del espesor de hielo. Existen diversos métodos utilizados para medir espesor de hielo. El método más utilizado actualmente es el radio eco sondaje (RES), el cual es un método activo de sensoramiento remoto de gran portabilidad, fácil manejo, precisión y bajo costo, permitiendo medir espesor de hielo junto con la determinación de la estratigrafía interna del mismo y la topografía subglaciar.

Las condiciones en las que se trabaja en terreno para realizar las mediciones, a veces a miles de metros sobre el nivel del mar, con condiciones atmosféricas adversas (bajas temperaturas, nieve, viento, etc.), precisa de una optimización del sistema de

adquisición de RES, que nos permita una obtención de datos en forma eficiente y en lo posible que ayude a realizar un pre-análisis de los datos en tiempo real.

Dentro del LGCC-CECS se cuenta con un sistema de RES para medición de hielo templado. Este sistema cuenta con un transmisor de pulsos (modelo O.S.U y BRISTOL) (sección 2.4.1) un receptor y antenas transmisoras y receptoras. En cuanto al sistema de recepción, está compuesto por un osciloscopio marca Tektronix encargado de la digitalización de la señal y un computador portátil que almacena los datos. Lo que se necesita y motiva el desarrollo de esta tesis es que al momento de la recepción de los datos se pueda obtener información de espesor y de la calidad de la señal en tiempo casi-real, además de implementar un sistema de post-procesamiento que permita obtener resultados en forma rápida y eficiente.

En la actualidad el sistema de RES del Centro de Estudios Científicos consiste en la adquisición de datos en terreno mediante una versión de software hecho originalmente en QBasic el año 1996 por el Sr. Mike Kennett en la Universidad de Magallanes. Una vez realizada la adquisición en terreno, se debe hacer en el laboratorio una conversión de datos del formato de adquisición binario de 16 bits (extensión .DZ2) a un nuevo formato binario de 8 bits (extensión *.DZT compatible con sistemas de información geográfica), que puede ser leído por un software correspondiente a un Sistema de Información Geográfica llamado Idrisi, el cual los vuelve a convertir a un formato binario de 8 bits (.img), para finalmente realizar el análisis de los datos. Después de esto los datos deben ser exportados a una planilla de Excel para obtener el espesor de hielo, y con otra aplicación diseñada en Fortran 77 los datos de radar son georeferenciados mediante un proceso de interpolación con los datos GPS adquiridos simultáneamente con los datos de radar. Si bien es cierto el método funciona, es un tanto lento y engorroso y no permite evaluar en terreno los datos obtenidos.

En cuanto a sistemas con similares características pero de distribución comercial, existen varias empresas que ofrecen distintas alternativas de software de adquisición y

procesamiento de datos de sistemas de radar de penetración terrestre (GPR por su sigla en inglés). Pero ninguna de ellas se ajusta realmente a las necesidades requeridas para el sistema de RES del LGCC-CECS, y su costo es normalmente varias veces superior al sistema actual. Además cada empresa de GPR crea su propio software de adquisición y procesamiento de datos para su respectivo radar, diseñado para las características propias del hardware y las normas de cada empresa. Entre dichas empresas se encuentran:

- IDS Ingegneria dei Sistemi S.P.A. [IDS2002]
- Sensors & Software Inc. [SSI2003]
- Mala Geoscience. [MGE2003]
- Parallel Geoscience. [PGE2003]
- Geophysical Survey Systems, Inc. [Geo2004]

1.3 Importancia y naturaleza del estudio

Este estudio es un aporte al método de radio eco sondaje en los siguientes aspectos:

- Obtención de información en tiempo real referente a la calidad de la señal de radar recepcionada.
- Obtención de información en tiempo real referente a la estructura interna del hielo y a la topografía subglaciar.
- Obtención de información en tiempo real referente al espesor aproximado del hielo.

- Estudio de la estructura de los formatos de los archivos de radar con los que se trabaja.
- Integración de todas las herramientas utilizadas en el método antiguo de procesamiento de datos de radar del LGCC-CECS en una sola herramienta.
- Disminución del tiempo de procesamiento de datos de radar.
- Aumento en la precisión de los datos de radar obtenidos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

El objetivo general de este proyecto es el desarrollo de un sistema de adquisición y procesamiento de datos de radar, que nos permita minimizar el tiempo de procesamiento de los datos, extraer el máximo de información de los datos y permitir un pre-análisis de los datos en terreno.

1.4.2 Objetivos específicos

- Estudio teórico y comprensión del sistema de RES existente.
- Estudio y selección del formato de adquisición de datos de radar.
- Desarrollo del sistema de adquisición y procesamiento de datos de radar.
- Comprobación y validación de resultados.

Capítulo 2. Sistema de radar para glaciares y GPS actualmente en uso

2.1 Introducción

Este capítulo describe los glaciares y la importancia de su estudio, también se nombran algunos métodos utilizados para el estudio de su espesor, examinando en detalle el método de radio eco sondaje, describiendo su funcionamiento y las diferentes etapas. Además se especifica el lenguaje de programación seleccionado y el entorno en el cual se va a desarrollar el sistema. Finalmente se describe en forma breve el sistema de adquisición de datos GPS y algunos conceptos de proyecciones cartográficas que permiten georeferenciar los datos de radar.

2.2 Glaciares

Los glaciares son masas de hielo, formadas por la acumulación de nieve, la cual se transforma en hielo debido a procesos de compactación y metamorfismo. Bajo la acción de la gravedad, el hielo se mueve desde la zona de acumulación a la zona de ablación donde el hielo abandona el sistema por fusión, sublimación o por formación de témpanos en lagos o mar si es el caso. Los glaciares se forman en regiones donde la precipitación anual neta de nieve supera la cantidad que se funde y sublima durante el verano. Se asocian con más frecuencia a las zonas más cercanas a los polos, pero pueden encontrarse en muchas áreas montañosas, incluso próximas al Ecuador, como en las montañas de África y Sudamérica.

Las variaciones climáticas que experimenta el planeta afectan directamente a los glaciares. A su vez, las variaciones de los glaciares pueden afectar el clima y el nivel del

mar. Los glaciares son la reserva superficial de agua dulce más grande del planeta, y potencialmente podrían elevar el nivel global del mar en 70 metros en caso de derretirse completamente. Un parámetro básico en el estudio de los glaciares es el espesor del hielo y su estructura interna. Esto puede lograrse a través de varios métodos: gravimetría, magnetometría, exploración sísmica y radio eco sondaje (RES). Este último método es el método más utilizado, gracias a su portabilidad, fácil manejo, precisión y bajo costo.

2.2.1 Tipos de glaciares

Las ondas electromagnéticas emitidas por el transmisor del sistema de RES se comportan de manera distinta en el medio glaciar dependiendo del tipo de hielo. Los glaciares se pueden clasificar según su temperatura en dos grupos: glaciares fríos, en los cuales la temperatura se encuentra bajo el punto de fusión (0°C a presión atmosférica) y glaciares temperados, con temperatura del hielo en el punto de fusión. También existen los glaciares politermales que contienen tanto hielo frío como hielo temperado.

Los glaciares temperados cuentan con agua en su superficie, su interior y su base. El agua dificulta la propagación de las ondas electromagnéticas debido a una mayor dispersión de las ondas y mayores pérdidas por absorción a través del hielo, por lo que se alcanza menor profundidad en el hielo temperado en comparación con el hielo frío donde no existe agua. Los glaciares de la zona sur y austral de Chile por lo general son del tipo temperados y por lo tanto ofrecen limitaciones a la penetración de ondas de RES.

2.2.2 Importancia del estudio de glaciares

Los glaciares son fieles indicadores del cambio presente y pasado del clima, tanto a través de sus variaciones como del estudio de testigos de hielo. A través de testigos de hielo se puede estudiar información valiosa referente a condiciones medioambientales pasadas, como por ejemplo erupciones volcánicas, explosiones de bombas atómicas, y diversos parámetros climáticos. Mediante modelos se puede predecir como se comportará el clima y también los glaciares en el futuro.

2.3 Métodos utilizados para medición de espesor de los glaciares.

Se pueden emplear diversos métodos de medición de espesor de hielo, dentro de los más conocidos están el *método gravitacional* y el *método magnético*: miden variaciones de la fuerza gravitacional de la tierra y variaciones del campo magnético, respectivamente, a través de los cuales se puede obtener el espesor de hielo. Se puede emplear el *método sísmico*: consiste en medir el reflejo de ondas sísmicas generadas normalmente por una fuente explosiva dentro de un agujero cavado en la superficie del glaciar. Finalmente se puede utilizar el *método de radio eco sondaje*: el cual permite calcular el espesor de hielo mediante la emisión de ondas electromagnéticas a través del hielo y su posterior reflexión. El método de radar es preciso, fácil de transportar, liviano y de tamaño reducido. También se puede acondicionar para ser montado en aeronaves, convirtiéndolo en un método mucho más versátil para zonas de difícil acceso logístico terrestre.

2.4 Método de Radio Eco Sondaje (RES)

El método de radio eco sondaje es un método activo de sesoramiento remoto que consiste en la emisión de ondas electromagnéticas a través del hielo, que pueden viajar a través de éste gracias a la transparencia que el hielo ofrece a las ondas electromagnéticas en la frecuencia comprendida entre 1 MHz y 1 GHz [Jel1997]. Las señales son capturadas por las antenas receptoras luego de haber rebotado en los distintos reflectores internos y en la interfaz hielo-roca o hielo-sedimento rocoso del fondo, se digitalizan y almacenan en un computador. Los datos entregan información referente a la estructura interna del hielo y de la topografía subglaciar. El cálculo preciso del espesor se realiza en base al tiempo de retorno que tarda la onda en realizar el recorrido entre el transmisor y el receptor [Bog1985].

El sistema de RES puede tener la modalidad puntual, capturando datos estáticamente en cada punto de la superficie. También existe la modalidad de perfilado, normalmente impulsado mediante una moto para nieve o tractor que se desplaza sobre la superficie de un glaciar, o bien a pie con los equipos montados sobre mochilas, permitiendo en estos casos capturar datos del espesor de hielo y de la estructura interna del glaciar en forma continua sobre la superficie del glaciar (Fig. 2.1).

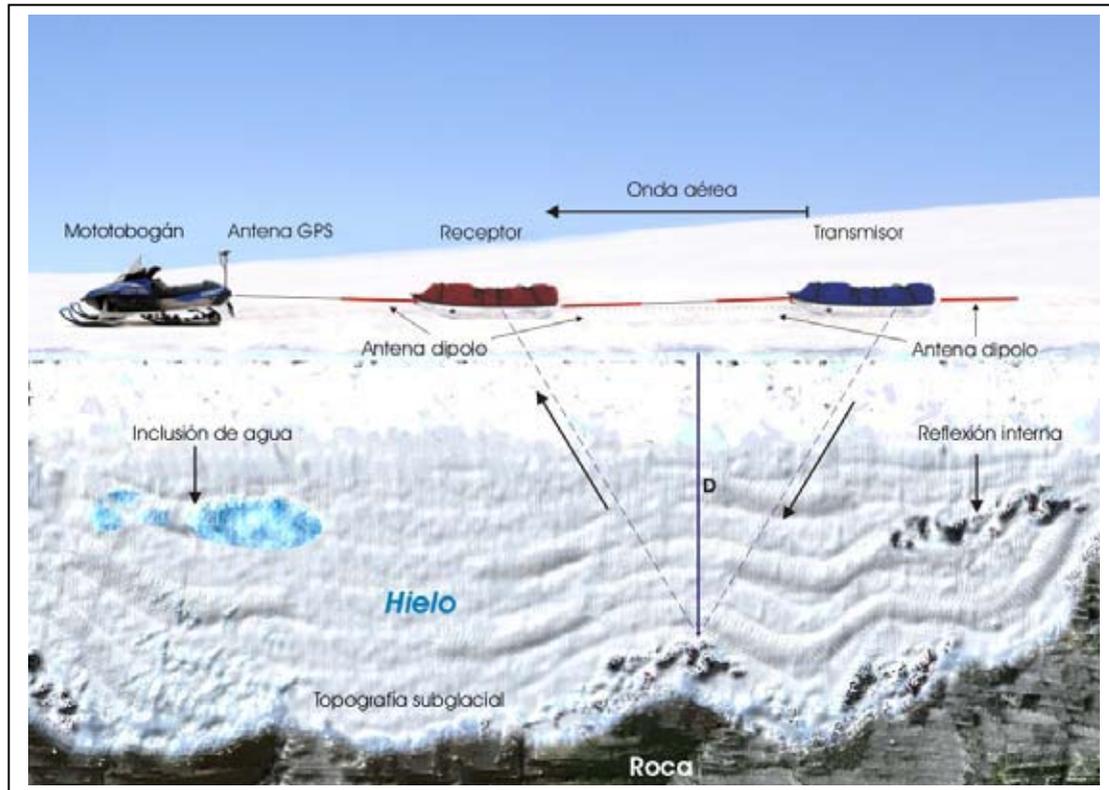


Fig. 2.1: Sistema de radio eco-sondaje en modalidad de perfilado impulsado por mototobogán.

2.4.1 Dispositivos que intervienen en el sistema de RES

Los dispositivos utilizados en el radar ocupado en el LGCC-CECS se pueden dividir en dos partes: los que pertenecen a la etapa transmisora (Tx) y los que pertenecen a la etapa receptora (Rx).

Dentro de la etapa transmisora se cuenta con un generador de pulsos de alto voltaje, las antenas transmisoras y una batería que proporciona la energía. Actualmente el LGCC-CECS posee dos tipos de generadores de pulsos, uno es el *transmisor Bristol* que es un transmisor diseñado en la Universidad de Bristol en Inglaterra, y el transmisor O.S.U. diseñado en la Universidad Estatal de Ohio en E.E.U.U.. El transmisor Bristol utiliza como interruptor de alta velocidad un único transistor en modo de avalancha, lo cual permite generar un pulso de salida peak to peak de 680 V [Car1998]. El transmisor

O.S.U., es un generador de alta frecuencia que genera un pulso de salida de 1600 V [Car1998].

Las antenas utilizadas en el Tx son del tipo dipolo resistivo [WyW1981] y su largo varía dependiendo de la frecuencia de resonancia que se quiera obtener. A mayor frecuencia menor rango de profundidad. En el LGCC-CECS se utilizan antenas de 8 m a 40 m de longitud del medio dipolo, que resulta en frecuencias aproximadas de 5 MHz y 1 MHz respectivamente [Car2002].

El receptor está constituido por las antenas receptoras, un balun, un osciloscopio y un computador portátil. Las antenas receptoras son idénticas a las antenas del transmisor. El balun es el encargado de preservar la simetría eléctrica presente en las antenas con respecto a la tierra y así evitar las corrientes desbalanceadas y la radiación en la línea de transmisión conectada a la antena [Jel1997].

El osciloscopio del LGCC-CECS es marca Tektronix modelo THS730A (Fig. 2.2 a), éste digitaliza las señales según parámetros (Anexo I) traspasados por la interfaz de comunicación (RS232C) desde el computador. Dentro de las características técnicas del osciloscopio se puede destacar su ancho de banda de 200 MHz, capacidad de muestreo de 1 Gigasample/segundo, tiene 2 canales, un largo de registro de 2500 puntos y pesa 1,45 kg. Este osciloscopio está diseñado para trabajar en terreno, es portátil y resistente, además trabaja con baterías. Todas las funcionalidades del osciloscopio pueden ser controladas desde el computador vía interfaz serial desde un hiperterminal o desde alguna otra aplicación que permita enviar comandos a través del puerto serial. La única restricción, al igual que en todo tipo de comunicación, es que estén ambos dispositivos trabajando a la misma velocidad.

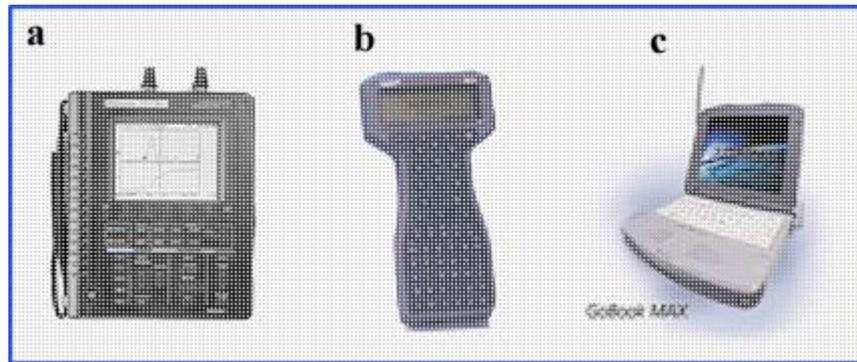


Fig. 2.2: Dispositivos presentes en el receptor del radar del LGCC-CECS: a) osciloscopio Tektronix; b) computador palmtop Husky; c) notebook Itronix.

Para la adquisición de los datos se cuenta con dos tipos de computadores (Fig. 2.2). La primera opción es un computador palmtop Husky FS3 (Fig. 2.2 b) con procesador Intel 386 de 25 MHz, con 2 Mb DRAM, sistema operativo MS-DOS v. 6.22 y con una pantalla de 240x64 píxeles [HFE1996]. Este computador palmtop funciona con baterías recargables y se utiliza en la versión del sistema de RES montado sobre mochilas y trasladado a pie. Sólo pesa 850 gramos y sus dimensiones son 23x13x4 cm, lo que lo convierte en una herramienta muy práctica y cómoda para las mediciones en terrenos complicados. La limitante que tiene esta máquina es que debido a sus características de hardware no puede realizar grandes procesamientos y tampoco almacenar gran cantidad de información, tema al cual se le debe prestar mucha atención cuando se trabaja en terreno.

La segunda opción es un computador notebook Itronix modelo GoBook Max (Fig.2.2 c), con procesador Intel Pentium III de 700 MHz, con 512 Mb SDRAM y con sistema operativo Windows 2000. Este computador tiene especificaciones militares que le permiten trabajar en condiciones climáticas muy extremas. Sus dimensiones (28x22x5 cm con la tapa cerrada) son mucho mayores que las del Husky, al igual que su peso (3 kg), por lo que sólo se utiliza en la modalidad de perfilado, con trineos y moto para nieve o tractor.

Otro dispositivo muy importante es el GPS (Sistema de Posicionamiento Global), que permite adquirir datos de altura y ubicación planimétrica, sobre la superficie de la tierra para la posterior georeferenciación de los datos.

Para el sistema de radar del LGCC-CECS se utilizan generalmente GPS de calidad geodésica (sección 2.7.4), de marca Javad modelo Legacy GD (Fig. 2.3) que entregan datos con errores del orden de pocos centímetros, después del procesamiento diferencial (sección 2.7.3).

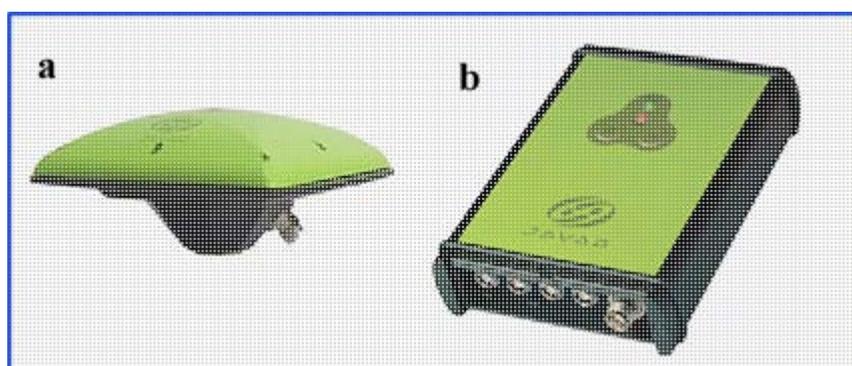


Fig. 2.3: GPS Javad Legacy GD: a) antena; b) receptor.

2.5 Cálculo de espesor

La onda electromagnética emitida por el transmisor viaja a través del aire y parte de ella rebota en la superficie aire-hielo (retorno aéreo) y parte se transmite al interior del hielo, rebotando en la base del glaciar, ya sea en la interfaz hielo-roca o bien hielo-sedimento (retorno de la base del glaciar) según sea la naturaleza del glaciar. Ambos retornos son capturados por la antena receptora y luego transmitidos al osciloscopio, en el que se puede visualizar una señal (traza) con la siguiente forma general (Fig. 2.4).

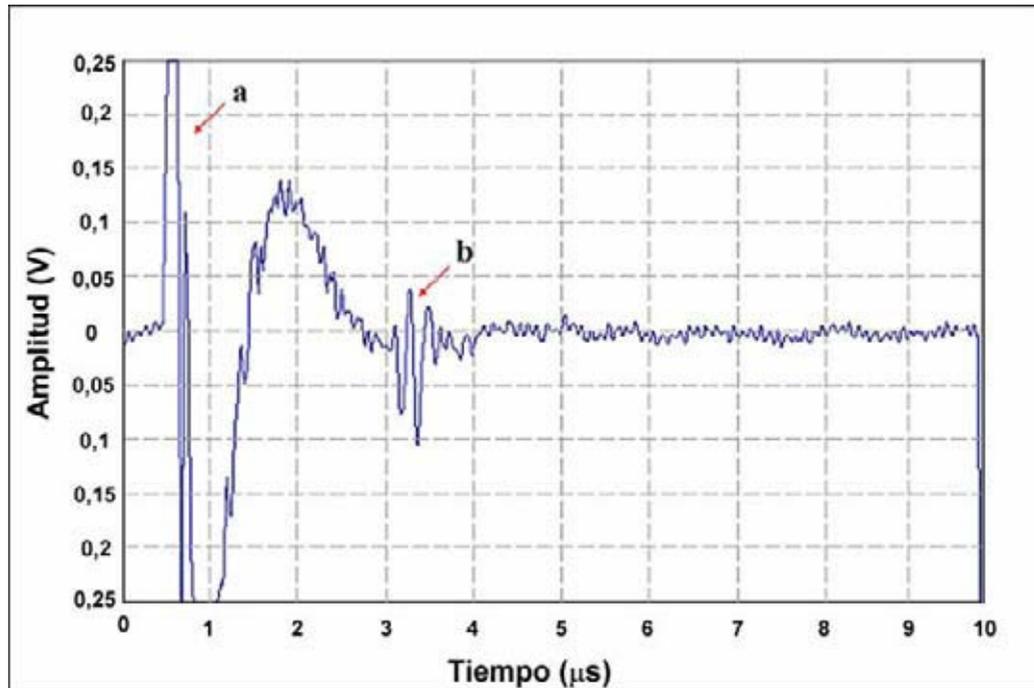


Fig. 2.4: Curva típica del sistema de radar: a) onda aérea; b) retorno de la base del glaciar.

El eje de ordenadas corresponde a amplitud (voltaje) y el eje de abscisas corresponde al tiempo. Entre las señales a y b (Fig. 2.4) se obtiene el intervalo de tiempo (Δt) que tarda la señal en viajar a través del hielo y rebotar en el fondo del glaciar. El cálculo de espesor para un radar biestático se realiza mediante la ecuación 2.1.:

$$H = \sqrt{\left(\Delta t + \frac{s}{v_a}\right)^2 \cdot \frac{v_i^2}{4} - \frac{s^2}{4}} \quad (2.1)$$

Donde:

H : espesor en metros.

V_a : Velocidad de desplazamiento de la onda electromagnética en el aire m/ μ s.

V_i : Velocidad de desplazamiento de la onda en el hielo en m/ μ s.

s : Separación entre las antenas del Tx y el Rx en metros.

Factores importantes a considerar para la implementación del cálculo de espesor de manera interactiva en el computador es el tamaño de la pantalla y el tamaño del área de dibujo, ya que estos intervienen directamente en la estimación de la variable Δt

(ecuación 2.2). También es necesaria una clara identificación del pulso superficial y del pulso de retorno de la base del glaciar. Para ayudar se han implementado algoritmos de contraste (sección 3.4) que se aplican a los datos en formato raster (sección 4.3.2). *Va* se considera fijo y no podrá ser modificado por el usuario de la aplicación de procesamiento, no así los valores de V_i y s , que son ajustables dependiendo de las condiciones físicas y geométricas.

El valor de Δt en μs (microsegundos) se calcula del siguiente modo:

$$\Delta t = N_p \bullet \frac{T \bullet d}{Tam} \quad (2.2)$$

Donde:

N_p : Número de píxeles que existen entre el pulso aéreo y el pulso de la base del glaciar.

T : Escala de tiempo en μs por división.

d : Cantidad de divisiones en el área de dibujo de la pantalla.

Tam : ancho del área de dibujo de la pantalla en píxeles.

2.6 Selección del lenguaje de programación y del entorno de desarrollo

Para seleccionar el lenguaje de programación se exige que se pueda utilizar tanto en MS-DOS como en Windows, para permitir su operación desde diferentes plataformas de hardware. Bajo este punto de vista un lenguaje que cumple con estas características y que además proporciona una considerable potencia para programación a bajo nivel es C++. C++ permite desarrollar una aplicación en MS-DOS que se puede utilizar, ya que es orientado a objetos y no es necesario realizar grandes cambios dentro de sus funciones y procedimientos en el desarrollo de la aplicación bajo Windows.

En el transcurso de este trabajo, se analizó el software existente en el LGCC-CECS, el cual realiza el proceso de adquisición de datos de radar, que está construido en QBasic y funciona bajo MS-DOS sin problemas. Se optó aquí realizar una modificación en el código de la aplicación en QBasic para que pudiese desplegar los datos en formato amplitud (Capítulo 4) mientras se realiza la adquisición, agregando información importante en tiempo real.

En cuanto al desarrollo de la aplicación de procesamiento y de adquisición bajo Windows se eligió el entorno de desarrollo de Borland C++ Builder 6. Ésta es una herramienta muy potente, primero por la robustez del lenguaje de programación que posee que es de propósito general y se adapta a múltiples situaciones, potenciado por las funciones y componentes que incorpora C++ Builder 6, facilitando el manejo de archivos binarios y la realización de interfaces con despliegue y procesamiento de imágenes. Además existe una mayor familiarización de parte del autor con este entorno en comparación con otros entornos que utilizan C++ como lenguaje de programación.

2.7 GPS

GPS es la abreviación de NAVSTAR GPS, este es el acrónimo en inglés de NAVigation System with Time And Ranging Global Positioning System (sistema de posicionamiento global con sistema de navegación por tiempo y distancia) que consiste en un sistema de navegación basado en la emisión de señales de radio provenientes de una constelación con al menos 24 satélites que orbita la tierra a una altura aproximada de 20.200 km (Fig. 2.5). El sistema permite el cálculo de coordenadas tridimensionales entregando información de posición, navegación, y tiempo a los usuarios que posean un receptor GPS y está disponible continuamente a nivel mundial, independiente de las condiciones climáticas [Gün1993]. La geometría final de satélites que existe actualmente

permite que al menos cuatro satélites estén visibles simultáneamente sobre el horizonte en cualquier parte de la tierra las 24 horas del día.

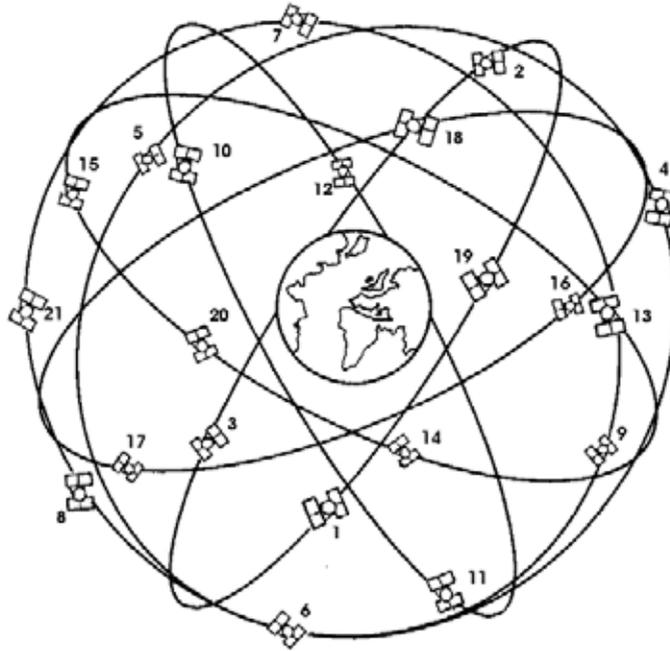


Fig. 2.5: Sistema de Posicionamiento Global (GPS), configuración de 21 satélites.

2.7.1 Principios de funcionamiento del sistema GPS

El sistema GPS está dividido en tres segmentos distintos: el *segmento de espacio*, que corresponde a la constelación de satélites; el *segmento de control*, que consiste de una estación de control maestro en tierra y 6 estaciones de monitoreo ubicadas alrededor del mundo, encargadas del control de los satélites; y el *segmento de usuario*, que corresponde a todas las unidades de recepción ubicadas en la tierra que capturan y procesan las señales enviadas por la constelación de satélites.

El sistema GPS tiene por objetivo calcular la posición de un punto cualquiera en un espacio geométrico de coordenadas (x,y,z) , partiendo del cálculo de las distancias del punto a un mínimo de tres satélites cuya localización es conocida. La distancia entre el usuario (receptor GPS) y un satélite se mide multiplicando el tiempo de retorno de la

señal emitida desde el satélite por su velocidad de propagación. Para medir el tiempo de vuelo de la señal de radio es necesario que los relojes de los satélites y de los receptores estén sincronizados, pues deben generar simultáneamente el mismo código. Ahora bien, mientras los relojes de los satélites son muy precisos los de los receptores son osciladores de cuarzo de bajo costo y por tanto imprecisos. Las distancias con errores debidos al sincronismo se denominan *pseudodistancias*. La desviación en los relojes de los receptores añade una incógnita más que hace necesario un mínimo de cuatro satélites para estimar correctamente las posiciones de tres dimensiones (3D). Con solo tres satélites se puede conocer una posición bidimensional (2D) sin información de altura.

2.7.2 Modos de operación de GPS

Existen básicamente dos modos generales de operación de GPS a través de los cuales podemos obtener la posición: *posicionamiento simple* y *posicionamiento diferencial*, además el posicionamiento GPS se puede realizar con el receptor funcionando de manera estática o cinemática (dinámica). Esta variedad de opciones de operación nos permite obtener una gran cantidad de niveles de exactitud para los posicionamientos GPS.

2.7.3 Posicionamiento simple y diferencial

El posicionamiento simple consiste en obtener una posición utilizando solamente un receptor GPS.

El GPS diferencial (DGPS) es simplemente el proceso de determinación de diferencias relativas en coordenadas entre dos puntos de receptores uno de ellos fijo (estación base de referencia) y otro remoto (móvil o fijo), cada uno de los cuales está simultáneamente recibiendo las señales enviadas por la constelación de satélites NAVSTAR GPS. El proceso implica la medida de la diferencia en rangos entre los

satélites y dos o más puntos de observación en tierra. Típicamente, el receptor GPS fijo está situado en una estación con posición conocida y el receptor remoto se coloca sobre un punto (o sobre un trayecto dinámico) desconocido que requiera determinación de las coordenadas. Ambos receptores adquieren simultáneamente los datos GPS para posteriormente realizar un procesamiento (post-proceso), o, alternativamente, el receptor de referencia transmite datos al receptor remoto para el cálculo "en tiempo real" de la posición (RTK). El principio base es que los errores de posición absolutos en los dos sitios de los receptores serán aproximadamente iguales por un instante dado en tiempo. Con este método se pueden obtener exactitudes inferiores al metro. El posicionamiento diferencial GPS se puede realizar en modo estático o cinemático [EM2003].

2.7.4 Receptores

Los receptores GPS reciben la información precisa de la hora y la posición de los satélites. Se reciben dos tipos de datos, almanaques y efemérides. Los datos del almanaque, consisten en una serie de parámetros generales sobre la ubicación y la operatividad de cada satélite con relación al resto de satélites de la red. Esta información puede ser recibida desde cualquier satélite, y una vez que el receptor GPS tiene la información del último almanaque recibido y la hora precisa, sabe donde buscar los satélites en el espacio. Cada uno de los satélites transmite dos señales de radio, L1 con una frecuencia de 1.575,43 MHz y L2 1.227,6 MHz. La señal L1 se modula con dos códigos de ruido pseudoaleatorios (Pseudo Random Noise, PRN), denominados Servicio de Posicionamiento Preciso (PPS) o código P o protegido, el cual puede ser encriptado para uso militar y el código de adquisición grueso (C/A Coarse/Adquisition) conocido como Servicio Estándar de Posicionamiento (SPS). La señal L2 se modula solamente con el código P. La mayoría de los receptores de uso civil usan el código C/A para obtener la información del sistema G.P.S. Cuando el receptor ha captado la señal de, al

menos, cuatro satélites calcula su propia posición 3D en la Tierra mediante la trilateración de la posición de los satélites captados.

Los principales componentes de un receptor GPS son típicamente:

- Antena con preamplificador.
- Sección RF con identificación de la señal y procesamiento de la señal.
- Microprocesador para control del receptor, muestreo de la señal y procesamiento de datos.
- Reloj (oscilador).
- Interfaz de usuario, comandos y panel de despliegue.
- Memoria, medio de almacenamiento.

Los receptores GPS se pueden clasificar de acuerdo a la capacidad de procesar las señales enviadas por los satélites, esta capacidad de procesamiento nos puede entregar errores inferiores al centímetro como también errores de hasta varios metros.

El LGCC-CECS cuenta con dos tipos de receptores, el primero es un receptor marca Trimble modelo GeoExplorer III, que es capaz de procesar sólo una frecuencia (L1) de las señales enviadas por la constelación de satélites, por lo tanto los errores que se obtienen con éstos, trabajando en modo diferencial, son del orden de medio metro. El otro tipo de receptor con el que se cuenta en el LGCC-CECS es marca Javad modelo Legacy GD que puede procesar al mismo tiempo dos frecuencias (L1 y L2) de las señales enviadas por los satélites, lo que nos entrega en modo diferencial errores de pocos centímetros. Los errores en modo diferencial dependen directamente de la distancia de la línea base, vale decir de la distancia entre el receptor base y el receptor remoto.

También se cuenta con navegadores marca Garmin modelo Etrex de frecuencia simple, que sólo permiten medir en posicionamiento simple con un error mínimo de 3 metros pero en promedio de 5 a 10 metros, dependiendo de la geometría de los satélites.

2.7.5 Sistemas de referencia

Para poder entender el GPS y su información de posición es importante entender el sistema de referencia en el cual está basado y cómo este sistema está relacionado con el sistema local del usuario. Los satélites GPS se refieren al elipsoide World Geodetic System de 1984 (sistema geodésico mundial WGS 84). Al comparar los datos geográficos obtenidos desde diferentes fuentes, se debe referenciar los datos al mismo datum y sistema de coordenadas, ya que de lo contrario se pueden introducir errores significativos.

La tierra no es una esfera uniforme, ni tampoco un elipsoide de revolución matemática. Por el contrario es un geoide definido como una superficie 3D donde la gravedad de la tierra se mantiene constante. Como el geoide es de difícil representación matemática, se utiliza un sistema de coordenadas geodésico basado en un elipsoide, adaptado a la forma de la tierra (Fig. 2.6), que provee un buen ajuste a la superficie. La diferencia de alturas entre el elipsoide WGS84 y el geoide puede ser positiva o negativa, con un valor absoluto de hasta varias decenas de metros dependiendo del lugar.

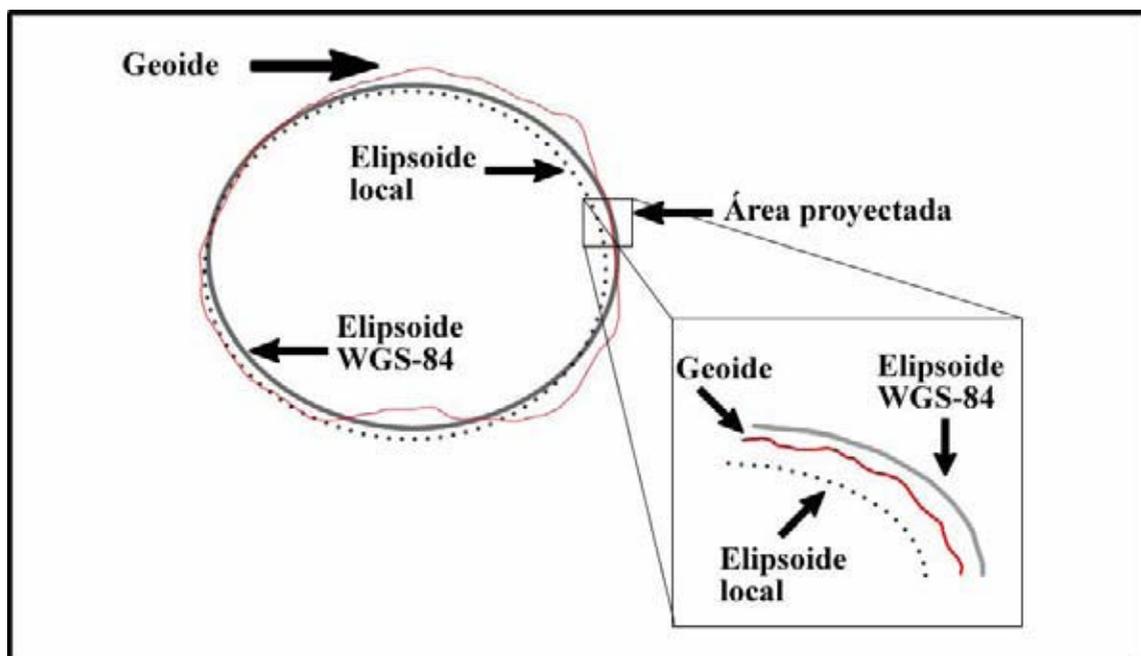


Fig. 2.6: Representación de dos modelos elipsoidales con el geoide.

Un datum define la posición del elipsoide relativo al centro de la tierra. Provee un marco de referencia para mediciones de ubicación sobre la superficie de la tierra. Este define el origen y la orientación de las líneas de latitud y longitud. Una vez que se selecciona un datum, se debe elegir como representar ese punto en la tierra con respecto al datum, para esto se utilizan las coordenadas geográficas (coordenadas como latitud y longitud).

Los cartógrafos necesitan representar la tierra esferoidal sobre una hoja de papel plana con las mínimas distorsiones. Esto significa que los puntos están definidos en un sistema de cuadrícula ortogonal por sus coordenadas Este, Norte y altura ortométrica (altura sobre el nivel del mar) el cual es llamado *proyección de mapa*. Estas proyecciones se muestran como planos, pero realmente definen pasos matemáticos para especificar las posiciones sobre un elipsoide en términos de un plano. Existen diferentes tipos de proyecciones dependiendo del área de la tierra que se quiere representar. Chile está bien representado por la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM), que utiliza el Instituto Geográfico Militar en la cartografía oficial del país. El sistema de radar del LGCC-CECS acepta coordenadas UTM para el posicionamiento 3D de los datos, a saber coordenada norte, coordenada este y altura expresadas en metros.

2.7.6 Proceso de interpolación

Se necesita georeferenciar mediante información GPS los datos de radar para su posterior representación.

Para cada disparo de radar se cuenta con el tiempo asociado que corresponde al momento en que se realizó la adquisición. A su vez los datos GPS incluyen el tiempo preciso en que se realizó la adquisición de éstos. Se debe calibrar el reloj del sistema de adquisición de radar (que en el equipo del LGCC-CECS corresponde a un computador

portátil de terreno) con el tiempo local que se obtiene del GPS. Estos dos tiempos, GPS y radar, no siempre coinciden, ya que cada uno funciona en forma independiente con su propio intervalo de adquisición, por lo tanto es necesario hacer una interpolación que nos permita asociar coordenadas GPS a los datos de radar.

Este proceso se realiza tomando un dato de radar y ubicándolo dentro de un intervalo de coordenadas GPS conocidas. Se calcula la diferencia entre los tiempos GPS y entre los tiempos GPS y radar, se asocia la diferencia de tiempos a la distancia recorrida y por interpolación lineal se obtiene la distancia entre el dato GPS y el dato de radar. Por ejemplo: se consideraron, en la aplicación desarrollada en la presente tesis (Capítulo 5), los siguientes datos GPS (Fig. 2.7), con coordenadas en formato UTM y los datos en columnas separadas por una coma. La aplicación acepta cualquier carácter como separador, ya que éste puede ser seleccionado por el usuario, pero la cantidad mínima de datos que necesita para realiza la interpolación son: este, norte, altura, fecha y hora. Las figuras 2.7 y 2.8 obtenidas a partir de un procesamiento real de la aplicación, ilustran un ejemplo.

Id	East (m)	North (m)	Fecha	HH:MM:SS	Altura (m)
1	, 401662.36	, 6754051.12	, 03.01.2005	, 10:48:00	, 5324
2	, 401630.29	, 6753852.66	, 03.01.2005	, 10:57:00	, 5300

Fig. 2.7: Ejemplo de datos GPS que necesita la aplicación para realizar la interpolación.

Id	Pixel sup.	Pixel inf.	Espesor (m)	Hora
102	, 1	, 45	, 32,2	, 10:53:58

Fig. 2.8: Ejemplo de un dato de radar que la aplicación entrega.

Para el ejemplo mostrado en las figuras 2.7 y 2.8 tenemos:

$$\Delta H = 540 s \quad \Delta h = 358 s$$

$$\Delta E = 32.062 m \quad \Delta e = \frac{358 * 32.062}{540} = 21.256 m$$

$$\Delta N = 198.455 m \quad \Delta n = \frac{358 * 198.455}{540} = 131.568 m$$

$$\Delta A = 24 m \quad \Delta a = \frac{358 * 24}{540} = 15.91 m$$

Donde:

ΔH : Diferencia entre horas GPS sucesivas.

$\Delta N, \Delta E, \Delta A$: Diferencia en coordenadas Norte, Este, y Altura respectivamente.

Δh : Diferencia entre hora de radar y hora GPS 1.

$\Delta n, \Delta e, \Delta a$: Nuevas diferencias obtenidas por interpolación lineal para cada una de las coordenadas.

Por lo tanto nuestros datos de radar georeferenciados de salida serán:

Id	, East (m)	, North (m)	, Altura (m),	AlturaSub (m),	Espesor (m),	Fecha
102	, 401641.10	, 6753919.55	, 5308.09	, 5275.86	, 32.23	, 03.01.05

Donde:

Altura (m): Corresponde a la altura superficial.

AlturaSub (m): Corresponde a la altura del fondo del glaciar.

La aplicación realiza este proceso de cálculo para la interpolación en forma automática en base al algoritmo (Anexo II).

2.8 Conclusiones

El sistema de radio eco sondaje resulta ser un método óptimo para realizar las mediciones de espesor de hielo en comparación con otros métodos menos precisos y logísticamente más complicados. En el diseño de un sistema de radar se requiere obtener información referente al espesor y a la calidad de las señales emitidas por el radar en el momento de la adquisición de los datos en terreno, así como también contar con un sistema que nos permita obtener los resultados de manera rápida y fácil, que se pueda implementar en computadores tipo palmtop y notebook, actualmente en uso en el LGCC-CECS.

En este capítulo se presentó también una breve descripción del sistema GPS y su funcionamiento. Se describe el proceso de interpolación de datos GPS con datos de radar que es fundamental para la representación 3D de los datos.

Se debe contar con datos GPS precisos para utilizar en la aplicación desarrollada en esta tesis de modo de obtener coordenadas 3D para cada dato de radar.

Capítulo 3: Procesamiento de Imágenes

3.1. Introducción

Las imágenes de radar se pueden representar en formato de trazas de amplitud variable (Fig. 3.1.a) ordenadas según su orden de captura o bien en modo raster donde cada amplitud de la señal se representa con un color.

En las imágenes de radar en formato raster en algunos perfiles puede existir muy poca claridad en el retorno de fondo, o en la imagen en general. Esto puede ser producido por una gran pérdida de energía de la señal por múltiples obstrucciones intraglaciaras antes del rebote en la interfaz hielo-roca o hielo-sedimento rocoso del fondo, o por una gran pérdida de energía debido a la gran profundidad, lo que produce un retorno de fondo muy pequeño, es decir con una amplitud muy baja. Una forma de mejorar la claridad gráfica es utilizando algoritmos de contraste aplicados a la imagen, ya que con éstos se pueden lograr mayores diferencias entre las intensidades de los píxeles, mediante la amplificación de las amplitudes de los puntos de las trazas. Efectivamente si realizamos un histograma de la imagen original podremos observar una gran concentración de valores en una pequeña zona dentro de la escala de intensidades (Fig. 3.1.b), y las imágenes mejoran considerablemente si aplicamos operaciones de contraste sobre los píxeles.

En este capítulo se explica el concepto de imagen digital, imagen raster de radar, algoritmos empleados y como éstos mejoran la interpretación de las imágenes de radar.

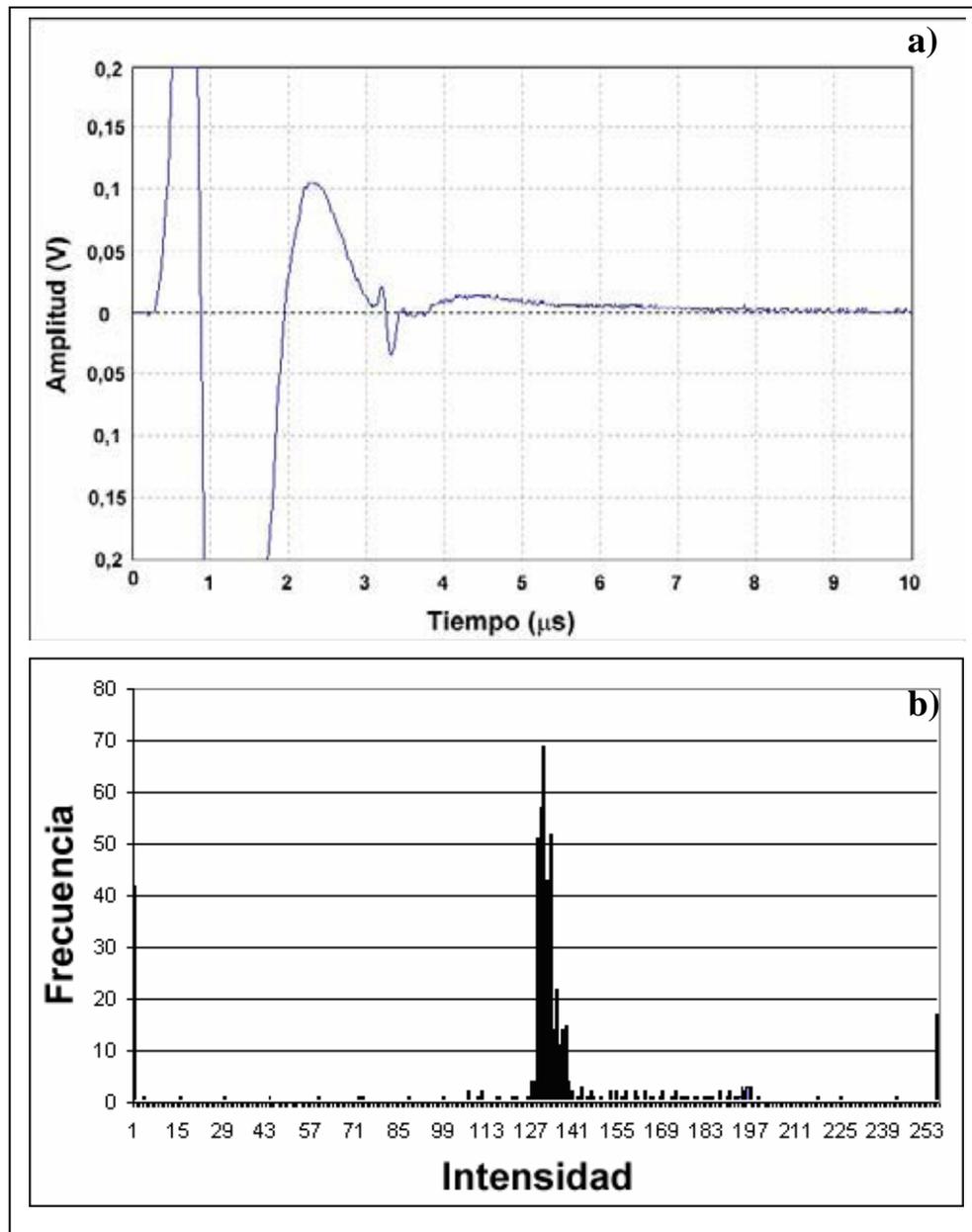


Fig. 3.1 a) Representación en modo A de una traza de 8 bits de resolución del sistema de radar LGCC-CECS. b) Histograma de frecuencia para la traza de la figura 3.1 a).

3.2 Imágenes digitales

Una imagen digital corresponde a un arreglo de dos dimensiones que se puede denotar como $f(x,y)$ en donde cada punto del arreglo se denomina píxel y tiene asociadas las coordenadas espaciales definidas por x y y . La imagen tiene un tamaño de $N \times M$ píxeles en donde N corresponde al ancho de la imagen y M corresponde al alto de

la imagen. Para el caso particular de las imágenes raster obtenidas a partir del radar de hielo, N corresponde al número de trazas y M al número de puntos por traza, que típicamente son 500 puntos en el sistema LGCC-CECS. En las imágenes de radar cada píxel corresponde a un valor de intensidad asociado a la amplitud de cada punto de la traza (Fig. 3.3). Tal valor requiere un determinado número de bits para representar la información y lo más usual es 8 bits que corresponde a un byte o bien, 16 bits que corresponden a 2 bytes. La Fig. 3.2 representa la imagen raster correspondiente a un conjunto de trazas idénticas mostradas en la Fig. 3.1.



Fig. 3.2: Representación raster de 190 trazas idénticas a la de la Fig 3.1.

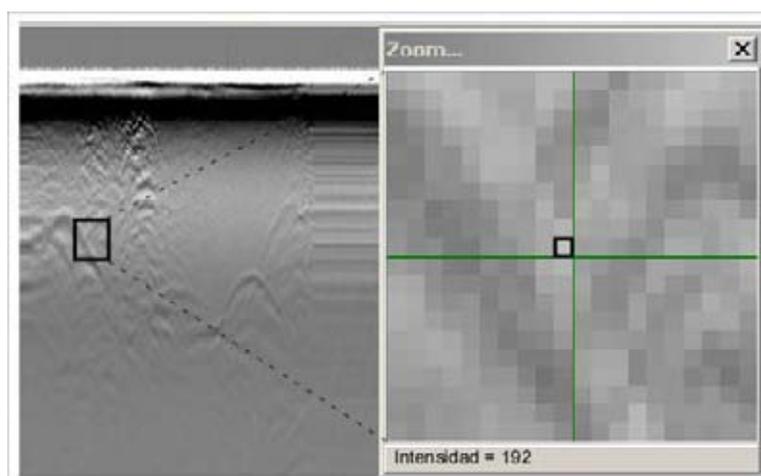


Fig. 3.3: Ampliación de una imagen raster, la selección del píxel central muestra un valor de intensidad en 8 bits de 192.

3.3 Procesamiento de imágenes digitales

El procesamiento digital de imágenes incluye un conjunto de técnicas que operan sobre la representación digital, con la finalidad de ayudar a su interpretación. En general, las técnicas de procesamiento de imágenes se aplican cuando resulta necesario realzar o modificar una imagen para mejorar su apariencia o para destacar algún aspecto de la información contenida en la misma, o cuando se requiere, medir, contrastar o clasificar algún elemento contenido en la misma. También se utilizan técnicas de procesamiento, cuando se requiere combinar imágenes o porciones de las mismas o reorganizar su contenido.

El método de procesamiento de imágenes seleccionado para procesar los datos de radar consiste en el tratamiento puntual de los datos, esto es algoritmos que trabajan individualmente con los píxeles de la imagen. A este grupo pertenecen los algoritmos relacionados con la modificación del contraste, que son los que se explicarán a continuación.

3.4 Modificación del contraste

Los datos de radar pueden ser desplegados utilizando 8 bits para representar cada píxel o 16 bits por píxel, dependiendo del formato del archivo. Para efectos prácticos se trabaja la imagen en escala de grises, lo que implica que se debe trabajar solo con 8 bits por píxel, con lo que se tendrán 256 valores de intensidad para cada píxel, que varía de 0 a 255. Por lo tanto cuando se trabaje con los archivos *.DZ2 (capítulo 4), los valores de los puntos al momento de la representación y del cambio de contraste deberán ser transformados a 8 bits. También se pueden representar las imágenes en color (como se muestra en el Capítulo 4), utilizando los 16 bits que tienen los archivos DZ2.

Una opción es desplazar todos los valores (Fig. 3.4) de las intensidades, por ejemplo de la traza de la Figura 3.1, manteniendo la misma forma del histograma aplicando los algoritmos de contraste (Fig. 3.4 y Fig. 3.5) que se describen a continuación.

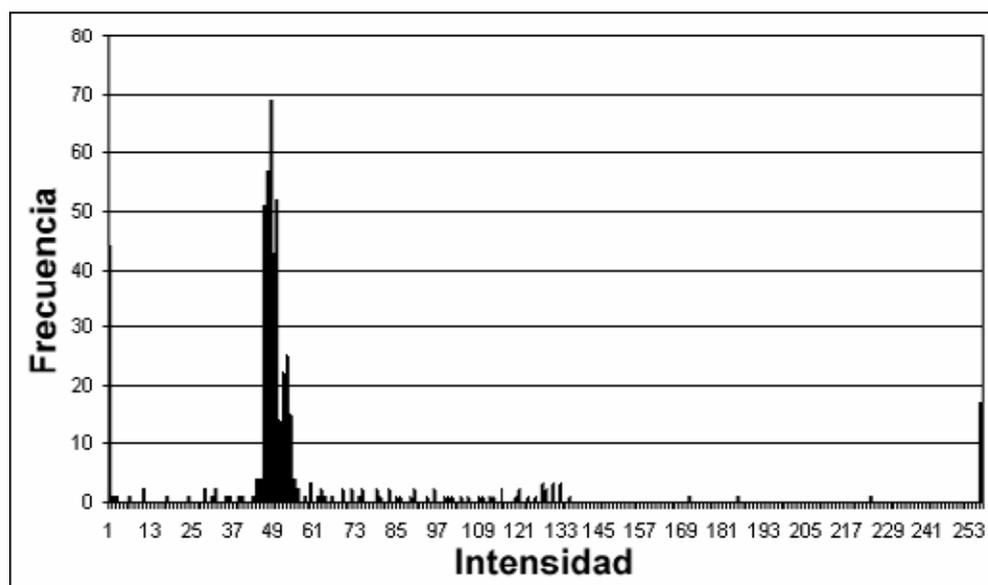


Fig. 3.4: Histograma de frecuencia para la traza del archivo de radar correspondiente a la figura 3.1, con la aplicación de un desplazamiento de las intensidades hacia valores más bajos.

El aumento de contraste consiste en el cambio de los valores de la intensidad de cada píxel, expandiendo el histograma original a un histograma que efectivamente utilice una escala amplia de valores en formato de 8 bits (Fig. 3.5).

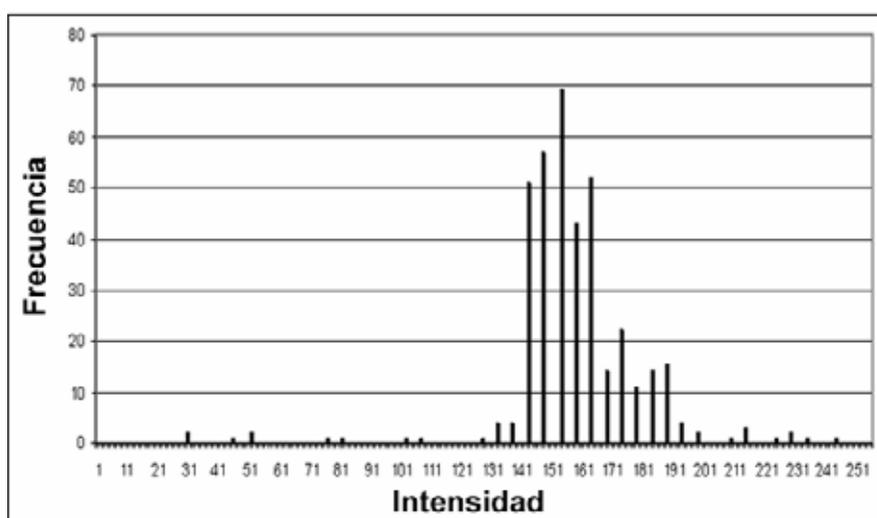


Fig. 3.5: Histograma de frecuencia para la traza del archivo de radar correspondiente a la Fig. 3.1, con la aplicación de un distanciamiento entre las intensidades según la ecuación 3.1.

3.4.1 Estiramiento del contraste.

El estiramiento de contraste o “contrast stretching”, como se conoce en inglés, es una técnica simple de realce de contraste que permite mejorar el contraste en una imagen mediante el “estiramiento” de su gama de intensidades ajustándola a una nueva gama deseada. Esta técnica puede ser implementada utilizando una función de escalamiento lineal sobre los píxeles de la imagen [Img2000], donde la entrada es una imagen en escala de grises y se obtiene como resultado una imagen en escala de grises con valores de intensidad modificados.

Para poder aplicar el estiramiento es necesario conocer los valores mínimo y máximo que pueden ser representados en la imagen digital. Para el caso de 8 bits (escala de grises) estos valores serían 0 y 255 respectivamente los que llamaremos a y b. En el caso de una modificación estática, esto es, sin una asignación por parte del usuario de los valores, sería necesario buscar los valores mínimo y máximo de las intensidades de los píxeles presentes en la imagen, llamaremos a estos valores c y d respectivamente. Entonces cada píxel se escala utilizando la siguiente función (Ecuación 3.1):

$$P_{out} = (P_{in} - c) \left(\frac{b - a}{d - c} \right) + a \quad (3.1)$$

siendo P_{out} el valor de la intensidad resultante del píxel luego de aplicar el contraste, y P_{in} el valor original del píxel.

Para el caso de la implementación desarrollada en este trabajo no se necesita buscar los valores de c y d, ya que éstos se podrán asignar en forma interactiva por el usuario (Fig. 3.6), dentro del rango permitido por los 8 bits de las imágenes en escala de

grises (de 0 a 255), pudiendo buscar los valores con los cuales obtiene una mejor representación.

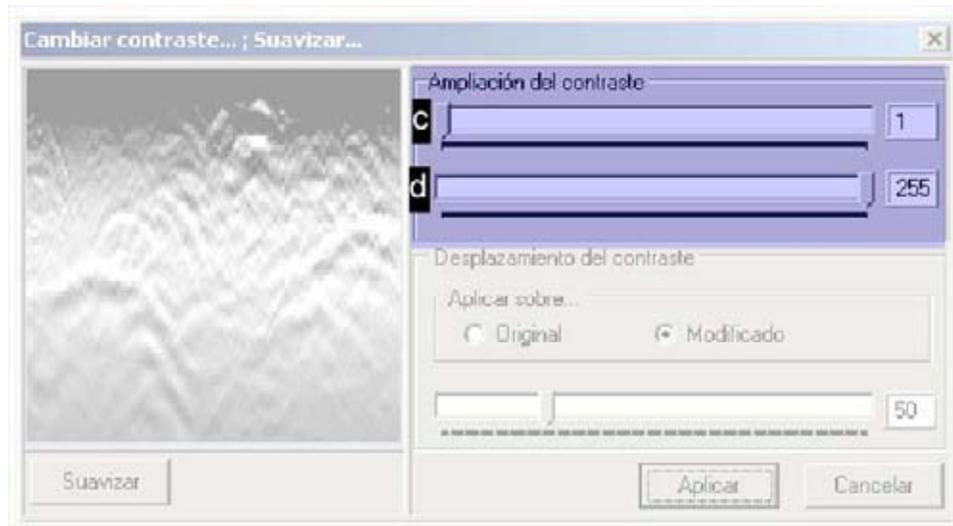


Fig. 3.6: Ventana de modificación de contraste, con valores de c y d asignados en forma dinámica.

3.4.2 Desplazamiento del contraste

En comparación con el sistema visual humano, un sistema digital de imagen de 8 bits tiene un rango dinámico considerablemente más pequeño. Esa es la razón porque imágenes digitalizadas, especialmente de una escena con alto contraste, se ven inferiores comparadas con las que vemos a simple vista. Una solución para hacer frente a grandes rangos dinámicos en escenas es la utilizada en cámaras de video, la cual generalmente convierte la irradiación no lineal E , con una ley exponencial en el valor de gris g (Ecuación 3.2), donde el valor exponencial γ es denominado *valor gama*. Con esta conversión exponencial, se puede simular la característica logarítmica de la visión humana mediante la transformación gama [Jäh2002].

$$g = E^\gamma \quad (3.2)$$

Esta operación homogénea no lineal sobre los puntos de una imagen en escala de gris tiene la forma (Ecuación 3.3):

$$P_{out} = \frac{255}{255^\gamma} P_{in}^\gamma \quad (3.3)$$

Donde gama toma valores entre 0.025 y 5 elegidos de manera arbitraria ya que en este rango podemos obtener un desplazamiento de contraste considerable, como vemos en la figura (3.7).

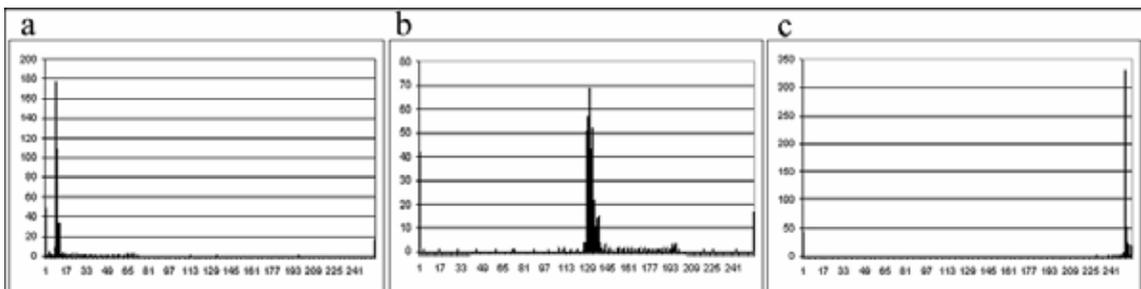


Fig. 3.7: b: Histograma de frecuencia para la traza de una imagen de radar; a: modificación de contraste de b mediante la Ecuación 3.3 con $\gamma=5$; c: modificación de contraste de b mediante la ecuación 3.3 con $\gamma=0,025$. La escala vertical es frecuencia y la escala horizontal es intensidad.

En la implementación del algoritmo en la aplicación de procesamiento de datos de radar el usuario puede modificar el valor de γ de manera interactiva en el rango descrito anteriormente, pero donde los límites son 1 y 200 respectivamente. Mediante la ecuación 3.4 se transforman los valores de este rango al rango 0.025 – 5, donde el valor 40 es equivalente a $\gamma = 1$, que mantiene el histograma sin variación:

$$\gamma = V * 0.025 \quad (3.4)$$

Donde V es el valor que entrega la barra de desplazamiento de contraste (Fig. 3.8).

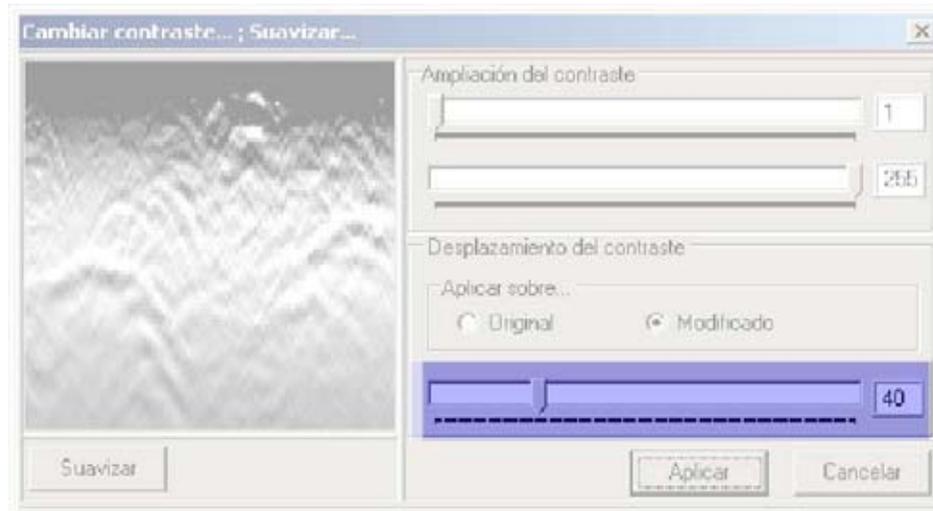


Fig. 3.8: Ventana de modificación de contraste, con valores de γ (ecuación 3.3) asignado en forma dinámica (cuadro azul de la imagen), y valores de a y b (ecuación 3.1) asignados en forma dinámica (en la imagen “ a ” corresponde al valor 1 y “ b ” al valor 255).

Para combinar estos algoritmos es necesario seleccionar la opción **Modificado** en la ventana de contraste y suavizado (Fig. 3.9). Si se quieren aplicar los algoritmos por separado es necesario seleccionar la opción **Original** dentro de la misma ventana (Fig. 3.9).



Fig. 3.9: Aplicación de algoritmos: a: aplicación por separado; b: aplicación combinada de algoritmos.

3.5 Suavizado de imagen

El suavizado de imagen tiene la finalidad de eliminar el ruido. Las imágenes de radar generalmente no presentan mucho ruido, y el ruido que en algunas oportunidades existe es debido a la intervención de señales ajenas a las emitidas por el radar, como por ejemplo comunicación por radio VHF. En la aplicación de procesamiento de imágenes de radar se implementó un algoritmo de suavizado de imagen con la finalidad de poder aplicar posteriormente con mayor efectividad un algoritmo de detección automática de la topografía subglaciar, que se menciona en el punto 3.6.

Existen varios métodos para eliminar ruido en imágenes digitales. El elegido por su rápida implementación y buenos resultados es el *suavizado mediante la mediana*, que consiste en seleccionar una matriz de píxeles de $M \times M$ con M impar. Se calcula la mediana de los valores de la matriz y se asigna al valor central. Se escogió un valor de M igual a 3, que corresponde a una matriz de 3×3 , que puede ser aplicada reiterativamente para obtener un suavizado cada vez mayor.

3.6 Detección automática de la topografía subglaciar

Con la finalidad de facilitar el trabajo de detección de fondo y además pensando en que el proceso de detección se podría hacer en tiempo cuasi-real, se desarrolló un algoritmo que permitiera detectar el fondo.

El algoritmo implementado necesita definir parámetros para aumentar la efectividad, funciona de la siguiente manera, considerando que nuestra imagen es de N filas x M columnas:

1. Se selecciona un vector $V_{n,i}$ que va a contener el patrón que indica el retorno subglaciar (Fig. 3.10), donde n es el píxel de inicio del vector e i es la columna

en la cual se encuentra. De manera arbitraria se selecciona un vector de 30 puntos.

2. Se selecciona un vector $V_{n,i+1}$ que corresponde a la traza siguiente a V_i y n va desde 0 hasta $N-30$, esto es desplazamos el vector $V_{n,i+1}$ a través de la columna $i+1$, mientras se compara con V_i .
3. El $V_{n,i+1}$ más parecido a V_i queda como el nuevo V_i y se repite el proceso, con esto hacemos un barrido por toda la imagen buscando el vector más parecido al vector original.

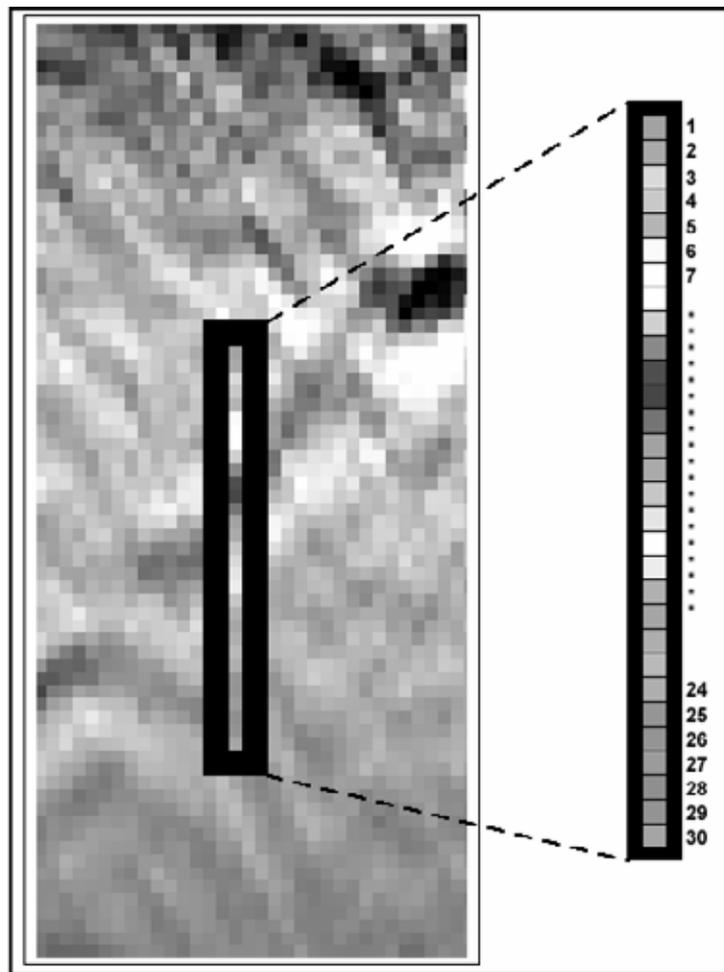


Fig. 3.10: Fragmento de imagen raster con vector V_i de 30 píxeles.

En resumen lo que hace este algoritmo es comparar las intensidades de los vectores reasignando en cada iteración el vector de fondo al vector más similar. El algoritmo entrega buenos resultados sólo si la imagen no presenta muchos retornos

intermedios ya que este algoritmo depende mucho de una constancia en la distribución de las intensidades.

En la práctica los resultados fueron limitados, por lo que el sistema interactivo manual sigue siendo la mejor opción. Este algoritmo se implementó sólo en modo de prueba y queda abierto a futuros desarrollos.

3.7 Conclusiones

La implementación de algoritmos de modificación de contraste ayuda mucho al reconocimiento de la topografía subglaciar de las imágenes de radar cuando los datos no son muy claros. Principalmente el algoritmo de *estiramiento de contraste*, el cual combinado con el algoritmo de desplazamiento de contraste entrega muy buenos resultados.

En lo que respecta al algoritmo de detección automática de la topografía subglaciar éste no entregó muy buenos resultados, por lo que el sistema manual continúa siendo la mejor opción. La posibilidad de seguir trabajando en este tipo de algoritmos queda abierta ya que podría ser de mucha utilidad, disminuyendo el tiempo de procesamiento.

Capítulo 4. Sistema de adquisición y selección del formato de adquisición

4.1 Introducción

Dentro de los objetivos de esta tesis está el describir los formatos de adquisición de datos y seleccionar el mejor formato de acuerdo a las necesidades que se tienen para el sistema de radar.

El sistema de adquisición existente en el LGCC-CECS previo a esta tesis está desarrollado en QBasic y funciona bajo MS-DOS. Este sistema permite almacenar la información que se obtiene del osciloscopio, pero no entrega ningún tipo de información referente al estado de los datos. Esto hace que la labor de los glaciólogos se dificulte puesto que se debe examinar en terreno constantemente el osciloscopio para poder verificar los datos. A continuación se describe el sistema de adquisición de datos implementado, y las ventajas y desventajas entre ambos sistemas.

Para el desarrollo de esta tesis se cuenta con el osciloscopio Tektronix THS730A actualmente en uso en el LGCC-CECS. Este instrumento puede ser controlado desde el computador a través de la interfaz RS-232 utilizando un conjunto de *comandos* y *consultas* (Anexo I). Los comandos modifican la configuración del instrumento, las consultas hacen que el instrumento retorne datos e información referente a su estado.

La mayoría de los comandos tiene ambas configuraciones, configurar y consultar. La forma de la consulta es la misma que la del formato de configuración excepto que se debe poner un símbolo de interrogación al final. Por ejemplo, ACQUIRE:Mode es formato de configuración y ACQUIRE:Mode? es el formato de consulta. En este capítulo todos los comandos se escribirán con al menos las primeras

tres letras en mayúscula de la forma recién vista, obviando la palabra comando para nombrarlos.

4.2 Formatos de adquisición

El osciloscopio Tektronix THS730A, presenta cuatro modos de adquisición, los cuales afectan la forma de la traza de radar. El modo de adquisición configurado con ACQUIRE:MODE determina como es configurado el valor final de adquisición a partir de un conjunto de muestras de datos, a saber: SAMPLE, PEAKdetect, AVERAGE y ENVELOPE. El modo utilizado en esta aplicación es el modo AVERAGE, ya que éste nos entrega como resultado una traza con los puntos promedios obtenidos de varias adquisiciones por separado, determinando una traza final con mejor resolución. El número de trazas a promediar se fija con ACQUIRE:NUMAVG <NR1>, donde <NR1> es el número de promedios que puede tomar valores entre 2 y 256.

En el proceso de digitalización el osciloscopio puede utilizar 8 bits o 16 bits para la representación de cada punto de la traza. Esto se puede configurar mediante el comando DATA:WIDTH <NR1>, donde: <NR1> = 1 para 1 byte (8 bits) por punto o <NR1> = 2 para 2 bytes (16 bits) por punto. Al utilizar el modo de adquisición average es recomendable utilizar 16 bits, ya que con esto obtenemos una mejor resolución, si se elige la opción de 8 bits se pierde el byte menos significativo de cada punto de la curva.

La forma de enviar los datos desde el osciloscopio al computador, se puede configurar mediante el comando DATA:ENCDG que es equivalente al comando WFMPRE:ENCDG. La sintaxis para este comando es: DATA:ENCDG { ASCII | RIBinary | RPBinary | SRIBinary | SRPbinary}. El formato utilizado en este trabajo es DATA:ENCDG RPBinary que configura los datos en formato sin signo, esto es sólo valores positivos, de 0 a 255 para 8 bits y de 0 a 65535 para 16 bits y con transferencia del byte más significativo primero.

Éste formato da origen a dos tipos de archivos para los datos de radar: los archivos con la extensión *.DZT que corresponden a la elección de 8 bits por punto para la forma de onda y los archivos con extensión *.DZ2 que corresponden a 16 bits por punto. Ambos formatos poseen 1024 bytes por fila, lo que cambia en éstos (Fig. 4.1) es la forma en como se distribuyen estos bytes.

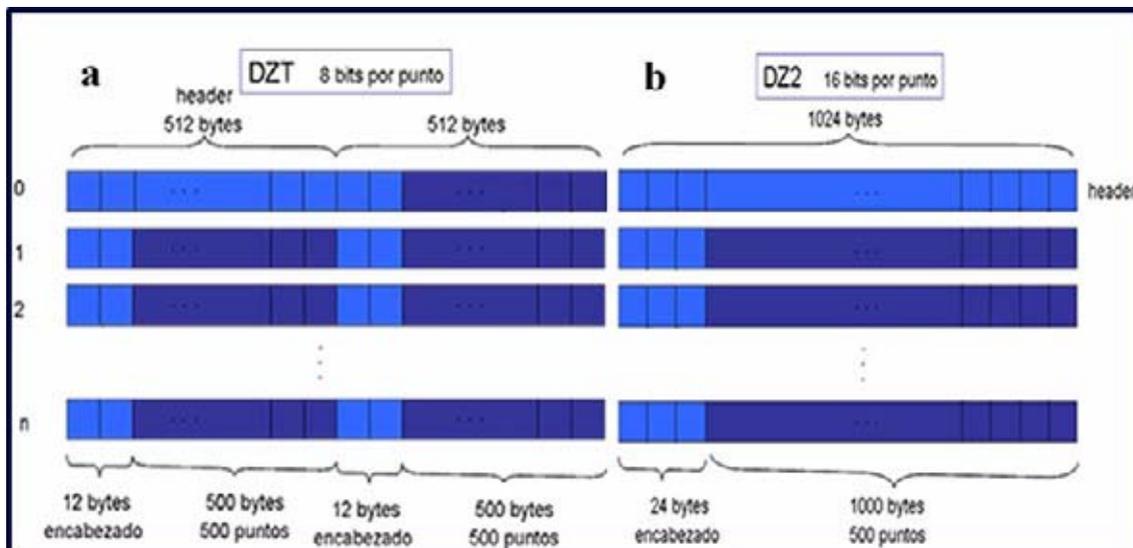


Fig. 4.1: Estructura de los archivos de radar. a: archivo DZT y b: archivo DZ2.

Los archivos DZ2 utilizan la primera fila para el header del archivo, que contiene información en formato ASCII referente a la configuración del osciloscopio, escala vertical y horizontal, nombre del archivo y hora de inicio entre otros. Cada una de las filas que vienen a continuación contiene sólo una traza, donde la estructura de los primeros 24 bytes está en formato binario y es la siguiente:

Año	Mes	Día	Hora	Minuto	Seg.	N traza	0	...
------------	------------	------------	-------------	---------------	-------------	----------------	----------	------------

donde “N traza” va de 0 a 255, la traza 256 se vuelve a marcar con 0 y así sucesivamente, el campo “...” son 16 espacios, luego de esto se presenta la traza de 500 puntos de 16 bits cada uno.

En la estructura del formato DZT el header del archivo ocupa los primeros 512 bytes de la primera fila, conteniendo la misma información que el archivo DZ2. Los siguientes 512 bytes de la primera fila contienen la primera traza, y las siguientes filas del archivo contienen dos trazas cada una. La estructura de cada traza tiene los primeros 12 bytes con una estructura igual a la del archivo DZ2, solo que el campo “...” tiene sólo 4 espacios, y los siguientes 500 bytes ocupan cada uno de los puntos de la curva (500 puntos), es decir 1 byte por punto.

Junto con la adquisición de los datos de radar se guarda en forma simultánea otro archivo con extensión *.LOG, que contiene la información de la hora en la cual se realizó la adquisición de cada traza de radar. Esta información sirve para posteriormente interpolar los datos de radar con los datos GPS (sección 2.7.6).

4.3 Despliegue de datos

Los archivos de radar almacenan los valores de las amplitudes de cada uno de los puntos de cada una de las trazas. Eso es tenemos una matriz de NxM donde N es el número de trazas y M es 500 que es la cantidad de puntos por cada traza. Cada valor de esta matriz es un valor de amplitud, que para los archivos DZT tiene un rango de 0 a 255 y para los archivos DZ2 de 0 a 65535. Para poder realizar el análisis de estos datos se deben desplegar en pantalla de una manera que sea comprensible para los usuarios, para esto existen dos formas o formatos de representación, el formato *amplitud* y el formato *raster*.

4.3.1 Formato amplitud

En el formato amplitud se toma cada una de las trazas y se grafican sus valores de amplitud ajustando al tamaño de la pantalla. Esto se hace simplemente multiplicando cada valor por un factor, que para el caso de 8 bits debe ser mayor que uno, y para el caso de 16 bits el factor debe ser mayor a cero y menor a uno. Este ajuste se debe hacer considerando que existe una proporción entre los valores de amplitud y la escala utilizada. La figura 2.4 nos muestra una traza de un archivo en formato amplitud, donde el eje de las abscisas representa el tiempo y el eje de las ordenadas las amplitudes de los puntos de la traza. La figura 4.2.b muestra una secuencia de trazas en formato amplitud.

4.3.2 Formato raster

En el formato raster representamos nuestra matriz de $N \times M$ puntos con valores de amplitudes como una imagen de $N \times M$ píxeles con valores respectivos de intensidad, ya sea de 8 bits o 16 bits. Vale decir el formato raster nos permite visualizar la secuencia total de trazas en forma de imagen, correspondiendo cada traza a una columna, asignando colores a cada rango de amplitud (Fig.4.2).

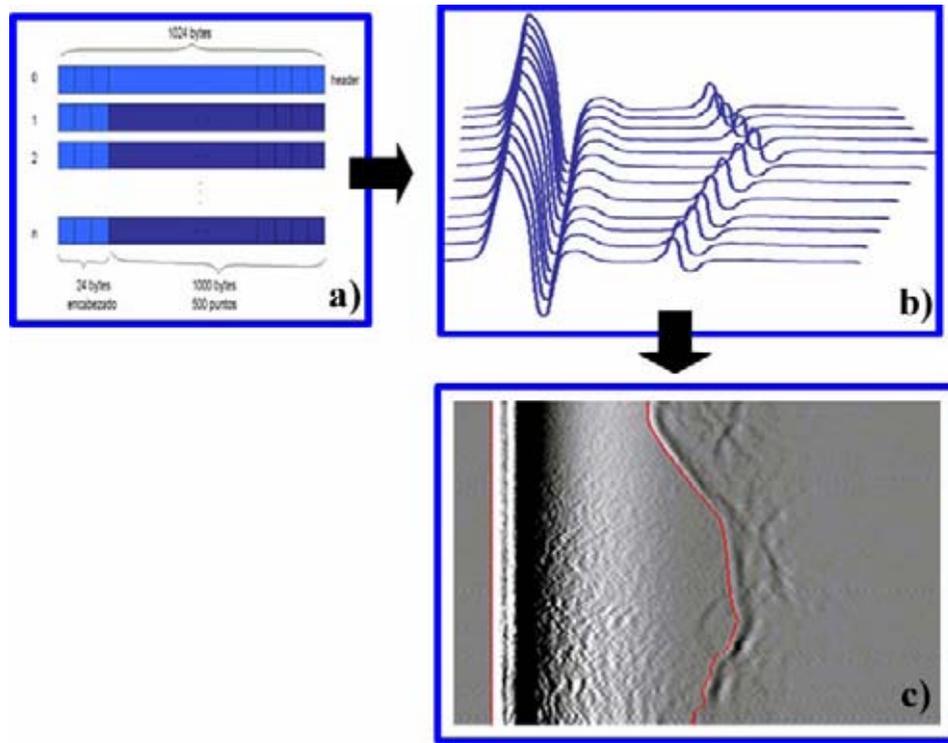


Fig. 4.2: Diagrama que muestra como se representan los formatos amplitud b) y raster c) a partir de los datos contenidos en el archivo a).

El formato utilizado para representar las imágenes raster, tanto en colores como en escala de grises, es el RGB (Rojo, Verde, Azul), en el cual se asigna a cada color 8 bits. Son necesarios entonces 24 bits para hacer esta representación, con la cual se puede obtener un total de aproximadamente 16 millones de colores (2^{24} colores). El cubo de la figura 4.3 muestra las posibilidades de representación. Si se elige escala de grises se debe seguir el vector central (línea segmentada en la Fig. 4.3), que asigna igual valor a los 3 colores, comenzando en negro (0,0,0) y terminando en blanco (255,255,255). Por ejemplo un valor de gris claro sería (200,200,200).

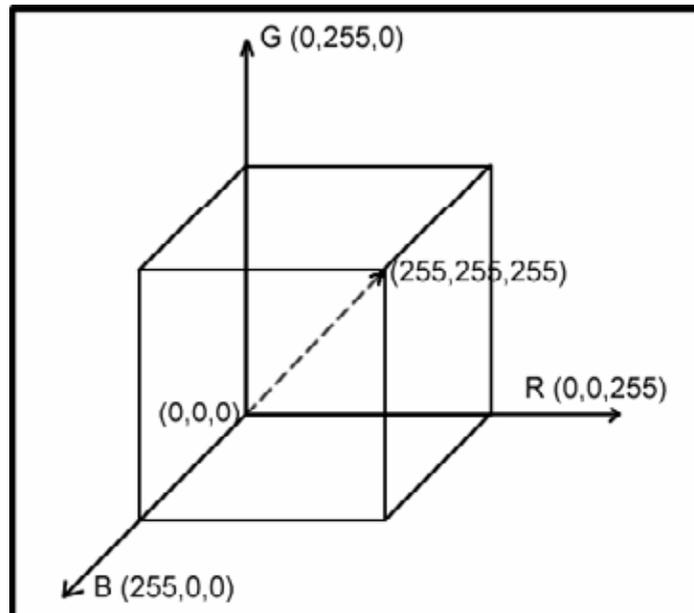


Fig. 4.3: Cubo RGB con escala de grises representada por el vector de línea segmentada.

Representar los datos en escala de grises resulta muy fácil cuando éstos están en 8 bits, ya que sólo se asigna el valor de amplitud a cada color R, G y B. Si los datos están en 16 bits debemos transformarlo a 8 bits y luego asignarlo a los colores. Se puede transformar a 8 bits cortando el byte menos significativo o truncando la división del valor por 256, en ambos casos se obtienen los mismos valores.

También se puede representar la imagen raster en colores, pero para esto se debe buscar una manera ordenada que permita introducir los 16 bits disponibles en los 24 bits con que se cuenta en el formato RGB y que proporcione cómo resultado una imagen congruente. Una de las formas de representación es la que se muestra en la figura 4.4, donde se realiza una trayectoria de 6 vectores que parte en un azul medio (0,0,125) y termina en un rojo medio (125,0,0), y a cada uno de estos 6 vectores se le asigna un intervalo de intensidades. Por lo tanto se obtienen 6 intervalos asignados a los 6 vectores. En la Figura 4.4 el cubo está centrado en verde (Fig. 4.5 d), por lo tanto todas las amplitudes que se encuentren cercanas a los valores medios del intervalo (esto es amplitudes cercanas a 32768) serán de color verde. También se implementó esta forma rotando el cubo y dejándolo centrado en azul (Fig. 4.5 c).

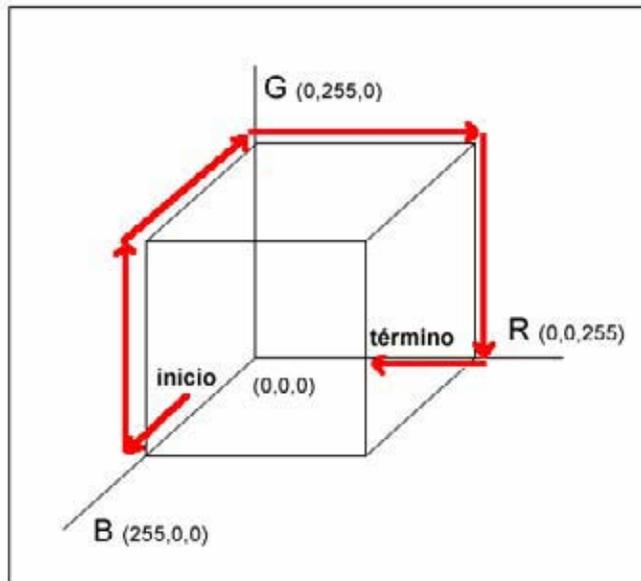


Fig. 4.4: Cubo RGB con trayectoria para representación en colores.

Otra forma de representar colores es simplemente dejando los valores sin ningún cambio, ya que se dispone de 16 bits. Esto quiere decir que sólo se ocupan 2 colores de los 3 existentes en RGB. Por lo tanto la imagen resultante tiene un color entre verde y rojo (Fig. 4.5 b).

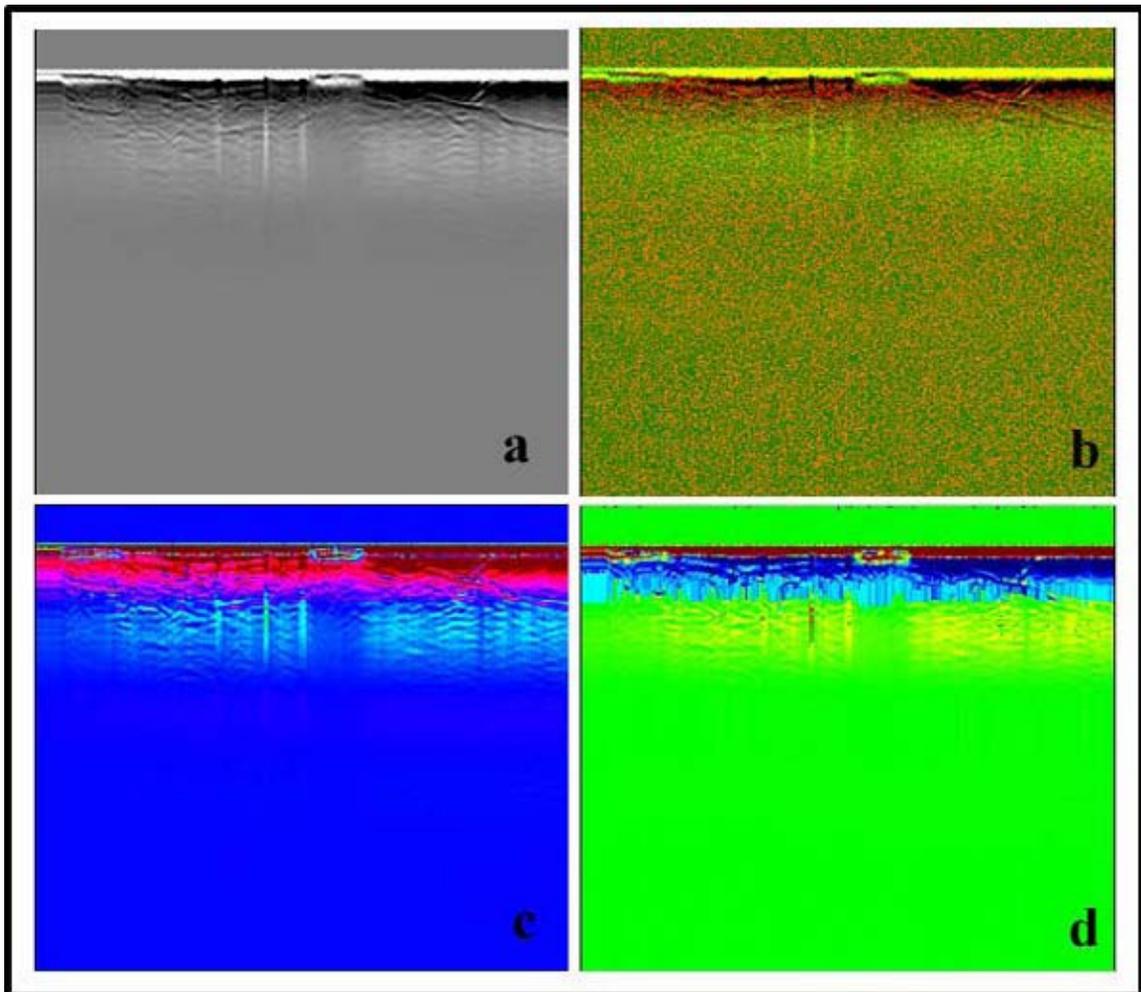


Fig. 4.5: Imagen raster con distintas representaciones. a: imagen en escala de grises. b: imagen representada sólo con verde y rojo. c: imagen centrada en azul. d: imagen centrada en verde.

4.4 Selección del formato de adquisición

Para realizar una comprobación de la resolución de los dos modos de adquisición (8 bits vs. 16 bits) se tomaron 31 puntos consecutivos obtenidos de la primera curva del archivo N211N410.DZ2, correspondiente a un perfil de Antártica, los cuales se muestran en la Tabla 4.1. Se realizó una lectura de 16 bits (gráfico superior Fig. 4.6) y otra de 8 bits (gráfico inferior Fig. 4.6). En la lectura de 8 bits sólo se toman en cuenta los bits más significativos, tal como se puede ver en la columna con los valores en hexadecimal (Tabla 4.1). Esto es lo mismo que ocurre al hacer una recepción en modo AVErAge con 8 bits, donde el osciloscopio sólo envía el byte más significativo, descartando el otro

byte. Observando los valores 5, 6, 19 y 20 de la Tabla 4.1, en el caso de 16 bits hexadecimal, equivalentes a A180, A120, A280 y A280 y en 8 bits hexadecimal es A1, A1, A2 y A2 (ya que se pierden los bits menos significativos). Por lo tanto como se puede ver en los valores 5 y 6 (color celeste) se pierde información. Por otro lado si los valores son idénticos en formato de 16 bits, entonces también lo serán en 8 bits (color rojo).

ID	8 bits		16 bits	
	decimal	hexadecimal	decimal	hexadecimal
1	156	9C	40064	9C80
2	157	9D	40224	9D20
3	159	9F	40736	9F20
4	156	9C	39968	9C20
5	161	A1	41344	A180
6	161	A1	41248	A120
7	162	A2	41600	A280
8	162	A2	41504	A220
9	161	A1	41248	A120
10	163	A3	41760	A320
11	161	A1	41248	A120
12	163	A3	41760	A320
13	161	A1	41344	A180
14	161	A1	41248	A120
15	161	A1	41344	A180
16	161	A1	41344	A180
17	162	A2	41600	A280
18	161	A1	41248	A120
19	162	A2	41600	A280
20	162	A2	41600	A280
21	163	A3	41760	A320
22	164	A4	42016	A420
23	162	A2	41504	A220
24	161	A1	41248	A120
25	162	A2	41600	A280
26	161	A1	41248	A120
27	161	A1	41248	A120
28	159	9F	40736	9F20
29	160	A0	41088	A080
30	160	A0	40992	A020
31	158	9E	40576	9E80

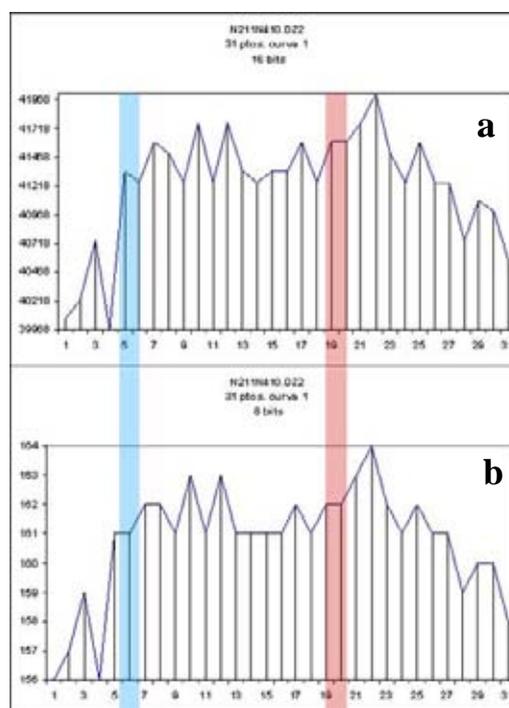


Tabla. 4.1: Datos en 8 y 16 bits de la 1ª curva del archivo N211N410.DZ2.

Fig. 4.6: Comparación de datos en formatos de 16 bits (a) y 8 bits (b). Los datos corresponden a los de la Tabla 4.1.

Si se realiza un histograma de frecuencia para distintos archivos almacenados en formato DZ2 y luego lo transformamos a 8 bits, se puede ver, en una primera aproximación, que la distribución de los datos se mantiene constante como muestra la Figura 4.7.

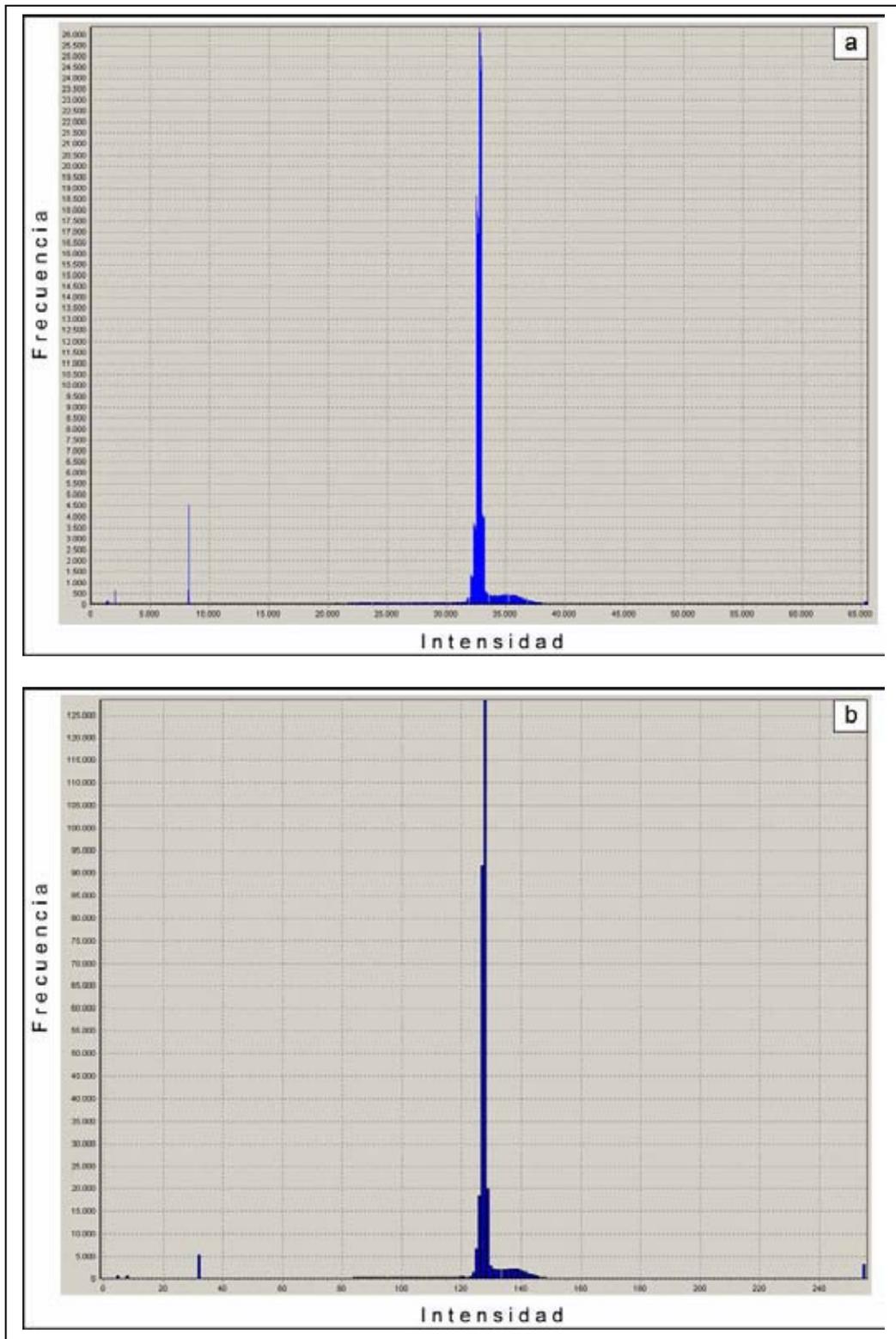


Fig. 4.7: Histograma de frecuencias para un archivo tomado en el glaciar del volcán Mocho, a) representado por 16 bits, b) por 8 bits.

Una comparación más detallada entre el formato de 16 bits y 8 bits indica algunas diferencias: Si se consideran todos los pares de puntos presentes en un archivo de 16 bits, y se toma la imagen como una matriz de $N \times M$, donde N es el número de

trazas y M es el número de puntos por traza (500) entonces los pares serán $((0,1)(0,2);(0,2)(0,3);(0,m-1)(0,m);...;(n,m-1)(n,m))$. Los pares de puntos se pueden comparar con sus equivalentes en 8 bits y examinar si son distintos. Por ejemplo, si se compara el primer par en 16 bits y el primer par en 8 bits, de dos archivos correspondientes a mediciones hechas en Villarrica (V2b4xx) y Mocho (Jpuyehue) sobre perfiles idénticos (Tabla 4.2):

	V2B4XX.DZ2 16 bits	V2B4XX.DZT 8bits	JPUYEHUE.DZ2 16 bits	JPUYEHUE.DZT 8bits
punto 1	32641	127	32256	126
punto 2	32544	127	29440	115

Tabla. 4.2: Intensidades de los puntos 1 y 2 de una traza representada en 8 y 16 bits de los archivos V2b4xx (glaciar del volcán Villarrica) y Jpuyehue (glaciar del volcán Mocho).

En el caso del archivo Jpuyehue la intensidad del par de puntos en 16 bits es distinto y el par de puntos en 8 bits también es distinto entonces no hay pérdida sustancial de información, debido a que se sigue manteniendo una diferencia. Pero en el caso del archivo V2b4xx la intensidad del par de puntos en 16 bits es distinta y en el par de 8 bits equivalentes es igual, entonces si existe pérdida clara de información.

Durante septiembre de 2004 y enero de 2005 se realizaron perfiles de radar en el volcán Mocho y volcán Villarrica respectivamente, repitiendo los perfiles en 8 bits y en 16 bits, se compararon todos los pares de todas las trazas de todos los datos capturados en las mediciones de radar realizadas en el glaciar del volcán Mocho-Choshuenco en septiembre del año 2004 y se obtuvo como resultado que en promedio un 12% de los datos en 8 bits no coincidía con los datos en 16 bits. Vale decir que hay una pérdida de información en un 12% de los datos.

Se realizó este mismo proceso con los datos capturados en enero del año 2005 en el glaciar del volcán Villarrica y el resultado fue que un 44.5% de los datos en 8 bits no coincide con los datos en 16 bits.

Se observaron las curvas en formato amplitud del archivo con menor porcentaje de coincidencia y del archivo con mayor porcentaje de coincidencia. La Figura 4.8 nos muestra estas curvas. La curva con menor porcentaje de coincidencia se puede apreciar mucho más limpia que la curva con mayor porcentaje de coincidencia. Esta estructura se mantiene en todos los archivos, es decir mientras menor es el porcentaje de coincidencia la curva resulta ser más limpia.

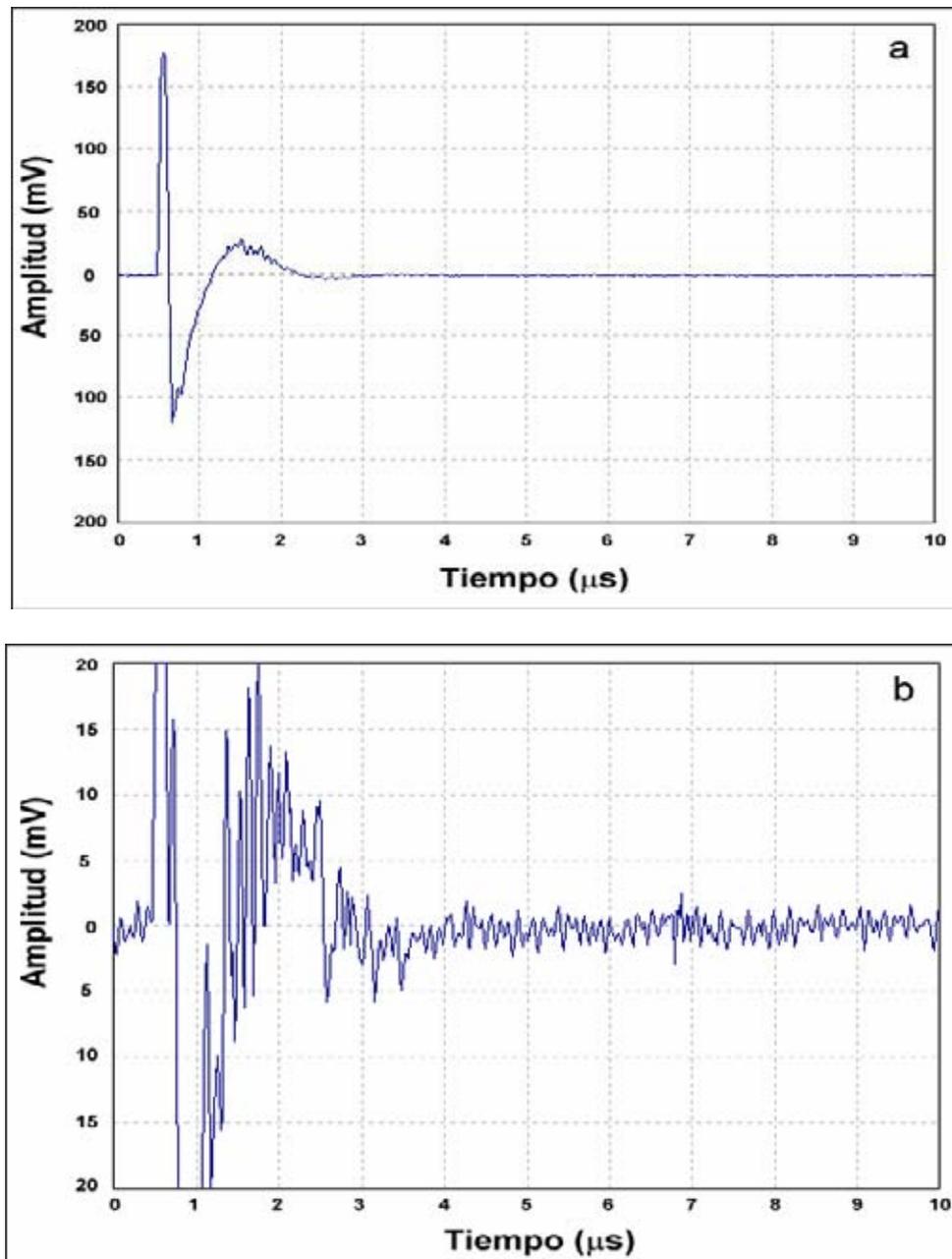


Fig. 4.8: Comparación de trazas en formato amplitud. a: traza correspondiente al archivo V2B4XX capturado en el volcán Villarrica con un porcentaje de coincidencia entre los datos en 16 y 8 bits de 40%. b: traza correspondiente al archivo JPUYEHUE capturado en el volcán Mocho con un porcentaje de coincidencia entre los datos en 16 y 8 bits de 92%.

En el caso de una traza suave, con una baja componente de alta frecuencia, el porcentaje de coincidencia entre 16 bits y 8 bits es menor, ya que las pequeñas variaciones en una escala tan grande como la de 16 bits no se notan en una escala más pequeña como la de 8 bits, como muestra la Figura 4.9. Por ejemplo, lo que se ve como una recta en 8 bits es en realidad una traza irregular. Esta irregularidad pierde importancia en datos como los tomados en el volcán Mocho-Choshuenco y Villarrica, ya que el pulso de retorno de fondo se encuentra muy bien marcado. Se presentarían problemas cuando el pulso de retorno de fondo sea muy cercano al nivel de ruido, para lo cual se hace necesario capturar los datos en formato de 16 bits para extraer una mayor cantidad de información.

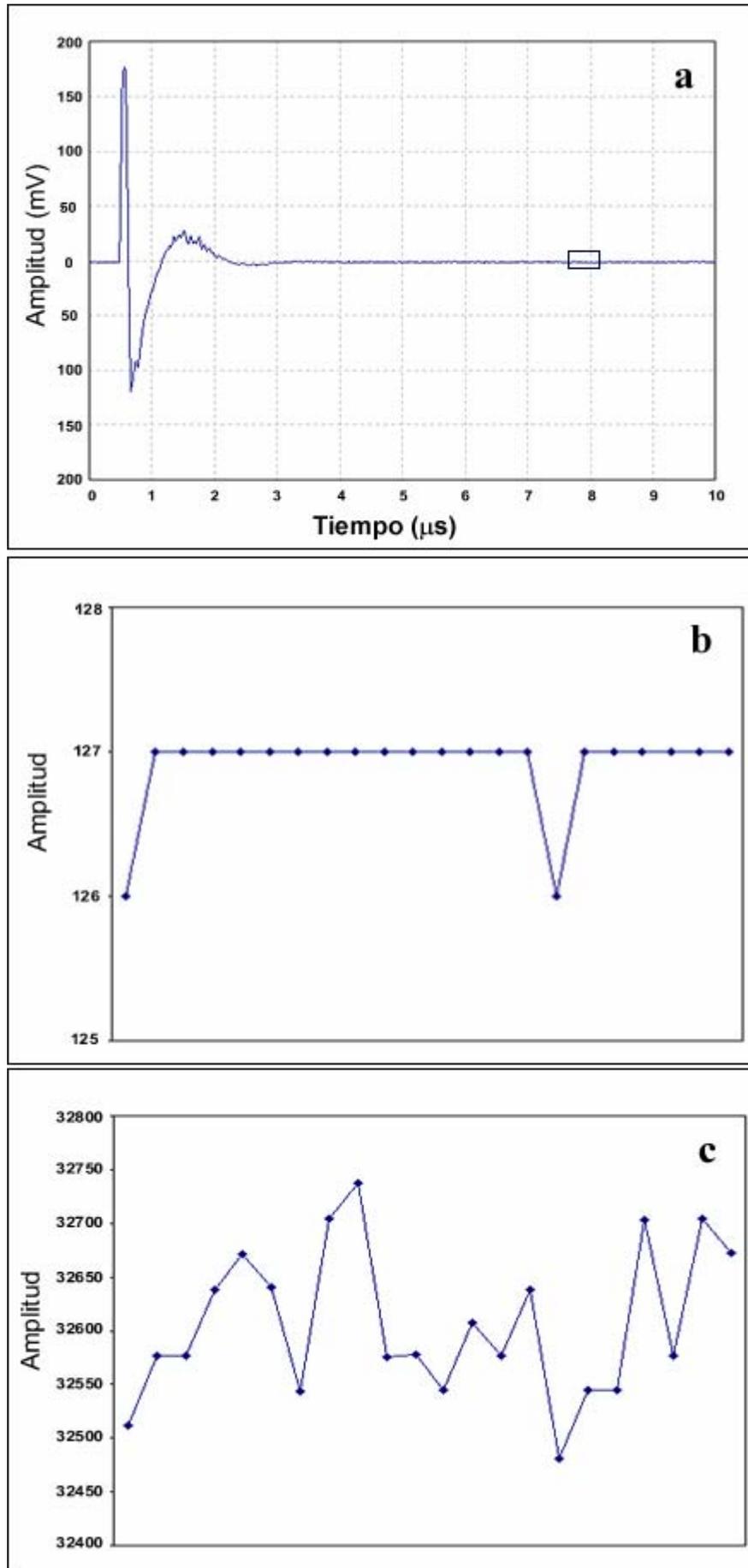


Fig. 4.9: Ampliación de una traza de un archivo de radar (a), representada con 8 bits (b) y con 16 bits (c).

4.5 Sistema de adquisición

El sistema de adquisición con que contaba el LGCC-CECS antes del desarrollo de esta tesis, sólo mostraba información referente al número de disparo de cada traza y su respectiva hora (Fig. 4.10), lo que no es de mucha utilidad, ya que los usuarios debían mirar el osciloscopio de manera constante para poder verificar si los datos que se estaban recibiendo eran adecuados.

```
File header
TMS-C v1.03 MIK 960904:FILE test.DZ2:ID ;BAUD 19200;DELAY .1;NUMAV 4;star 226;sl
op 725;wid 2
03-15-2004,18:09:04
:WFMPRE:DYI NR 2;DIT NR 16;ENCDG DIN;DN FMT RP;DYI OR MSD;CH1:WFID "Ch1. AC coup
ling. 1.0E-1 U/div, 5.0E-5 s/div, 2500 points, Average mode";NR_PT 500;PT_FMT Y;
XUNIT "s";XINCR 2.0E-6;PT_OFF 25;YUNIT "Volts";YMULT 1.5625E-5;YOFF 3.2768E4;YZE
RO 0.0E0
:CH1:PROBE:UNITS VOLTS;VOLTSSCALE 1.0E0;CURRENTSCALE 1.0E-3;:CH1:SCALE 1.0E-1;POS
ITION 0.0E0;OFFSET 0.0E0;COUPLING AC;BANDWIDTH TWENTY;INVERT 0
Hit u to unlock scope. ESC to quit. or any other key to collect
Hit F10 to pause...

INPUT.TIME$
2 1 18:09:12
3 2 18:09:14
4 3 18:09:16
5 4 18:09:18
6 5 18:09:20
7 6 18:09:22
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 PAUSE
```

Fig. 4.10: Pantalla de la antigua aplicación de adquisición de datos.

A la aplicación existente se le hizo una modificación para que muestre los datos en formato amplitud a medida que se adquieren en terreno (Fig. 4.11). Para el caso del computador palmtop Husky FS3 que posee una ventana de despliegue muy pequeña, se ajustaron los valores para poder ser desplegados en la resolución de 240x64 píxeles (Fig. 4.11.a).

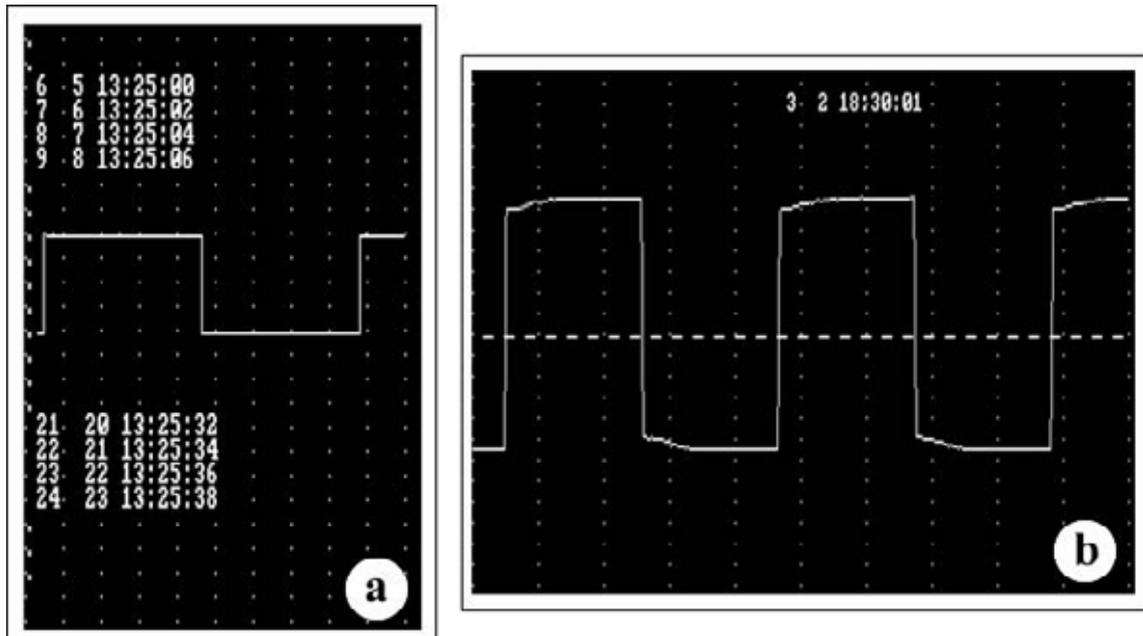


Fig. 4.11: Pantalla de la aplicación de adquisición con despliegue de datos en formato amplitud. a: Pantalla del computador Husky FS3 de 240x64 píxeles; b: Pantalla del computador notebook de 640x255 píxeles.

El Husky FS3 tiene un procesador 386 de 25Mhz de capacidad de procesamiento reducida y no se puede desplegar en forma continua la curva en formato amplitud, por lo que se programó el despliegue de una curva cada 15 disparos, y se muestra el valor del disparo y la hora a intervalos mas pequeños, usualmente cada 2 segundos.

4.5.1 Sistema de adquisición bajo Windows

El nuevo software desarrollado para Windows llamado EcoRamp Adq, actúa básicamente de la misma forma que lo hace el sistema bajo MS-DOS, esto es, guardando los datos es un archivo con el formato asignado por el usuario, junto con un archivo *.LOG (sección 4.2) que contiene la información de la hora de adquisición y agregando las funcionalidades que provee el ambiente gráfico (Fig. 4.12). Este sistema despliega en tiempo real los datos en formato A, y en formato raster, permitiendo observar la estructura interna del glaciar, la topografía subglaciar y valores de espesor aproximados representados en una escala vertical.

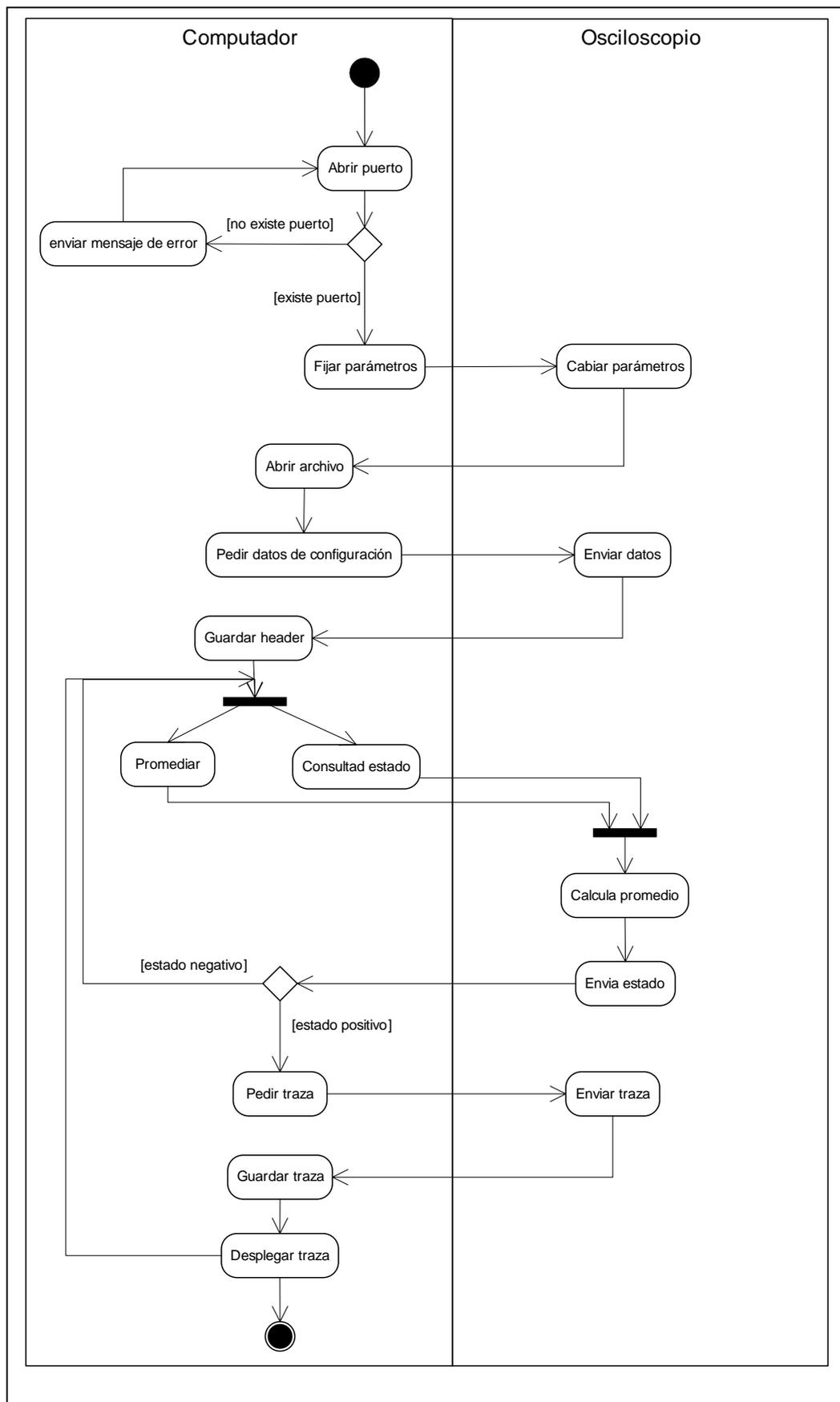


Fig. 4.12: Diagrama de actividad para el proceso de adquisición de datos bajo el sistema Windows.

La aplicación está dividida en cuatro secciones. En la primera (Fig. 4.13.a) se pueden cambiar y fijar los parámetros con los cuales se va a hacer la adquisición, estos

parámetros quedan guardados en un archivo (config.con). La segunda opción (Fig. 4.13.b) muestra los datos en formato raster y amplitud, con escala vertical en metros. La tercera opción (Fig. 4.13.c) muestra los datos sólo en formato raster con escala vertical en metros. La última opción muestra (Fig. 4.13.d) los datos de radar en formato amplitud.

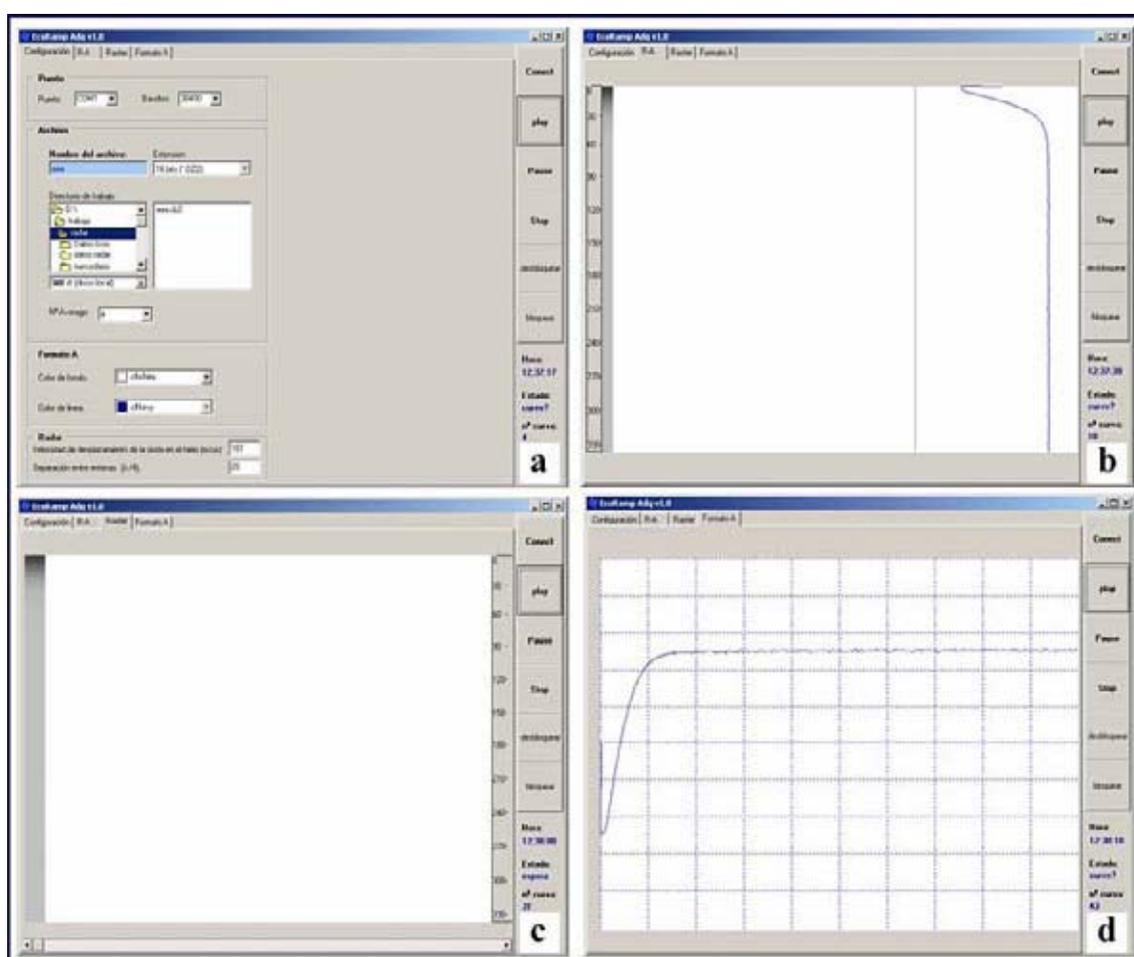


Fig. 4.13: Aplicación de adquisición EcoRamp Adq v1.0. a: ventana de configuración. b: ventana que despliega los datos en formato amplitud y raster. c: ventana de despliegue de datos en formato raster. d: ventana de despliegue de datos en formato amplitud.

4.6 Conclusiones

El formato de adquisición que hasta ahora ha ocupado el LGCC-CECS es de tipo DZ2 de 16 bits, formato que ocupa el doble de almacenamiento que el formato DZT de 8 bits. Sin embargo en la etapa de procesamiento se ha transformado el archivo DZ2 a DZT por limitaciones de los softwares de procesamiento de datos.

En este capítulo se estableció que en el formato de 8 bits se pierde información con respecto a los datos en 16 bits, la pérdida de información depende del tipo de señal que se reciba. La pérdida de información es mínima si se recibe un retorno de fondo fuerte muy por encima de la relación señal/ruido. Por el contrario si el retorno de fondo es débil se justifica capturar la señal en 16 bits. La adecuada utilización de algoritmos de procesamiento de imágenes también puede mejorar la representación de la señal.

El nuevo sistema de adquisición permite ver en la pantalla del computador información referente a los datos que se reciben con información en tiempo real. La información puede estar en formato amplitud o en formato raster. La implementación de la nueva aplicación de adquisición entrega información que facilita el trabajo en terreno, ayudando a economizar tiempo, energía y recursos en el desarrollo de las campañas.

Capítulo 5. Aplicación de procesamiento (EcoRamp v1.0)

5.1 Introducción

La etapa de procesamiento de datos que se utilizaba en el LGCC-CECS era bastante larga y engorrosa (Figura 5.1), y necesitaba de varias aplicaciones distintas (por ej. programas DZ2DZT en QBasic, IDRISI, Excel) y de muchas transformaciones de datos. Resultaba entonces necesario el desarrollo de una aplicación que permitiera integrar todas las etapas de este proceso en una sola aplicación.

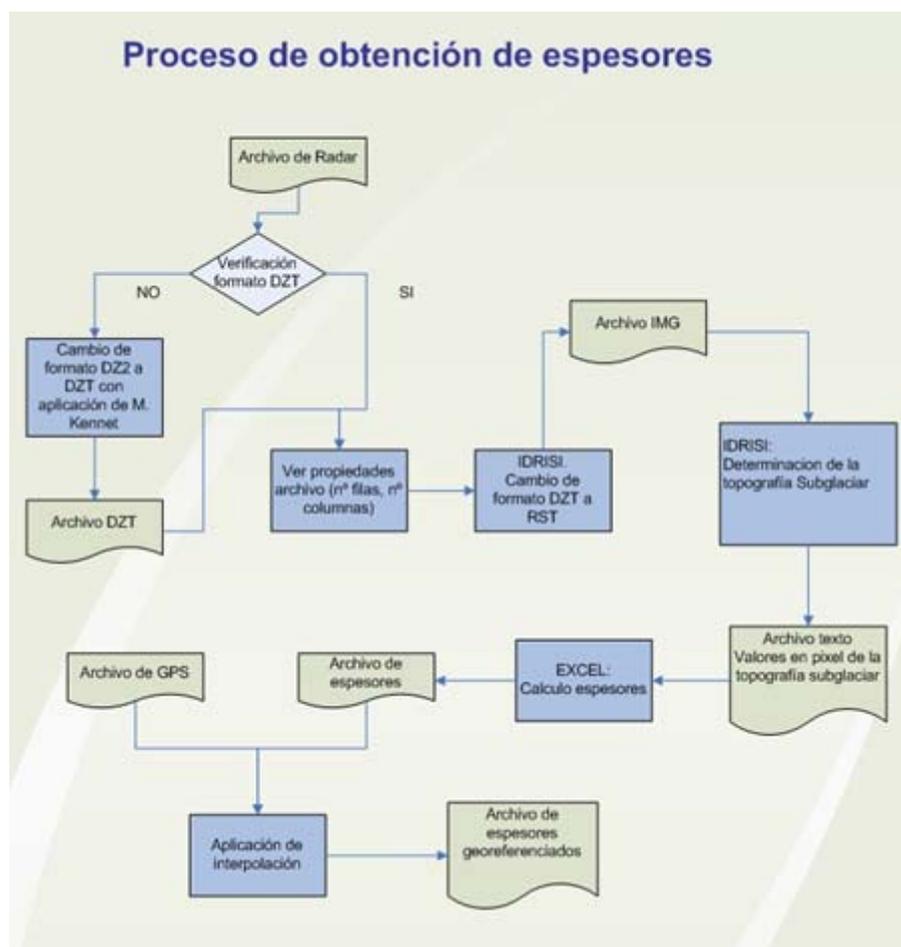


Fig. 5.1: Proceso de obtención de espesores.

En este capítulo se mostrará la aplicación desarrollada para integrar todas las etapas descritas en la Figura 5.1, que permite procesar los datos de radar a partir de la

incorporación de los archivos DZT o DZ2 según sea el caso y con la integración además en la etapa final del procesamiento de los datos GPS previamente procesados.

5.2 Diseño de la aplicación

Los casos de uso requeridos para el desarrollo de la aplicación de procesamiento de datos se presentan en la Figura 5.2.

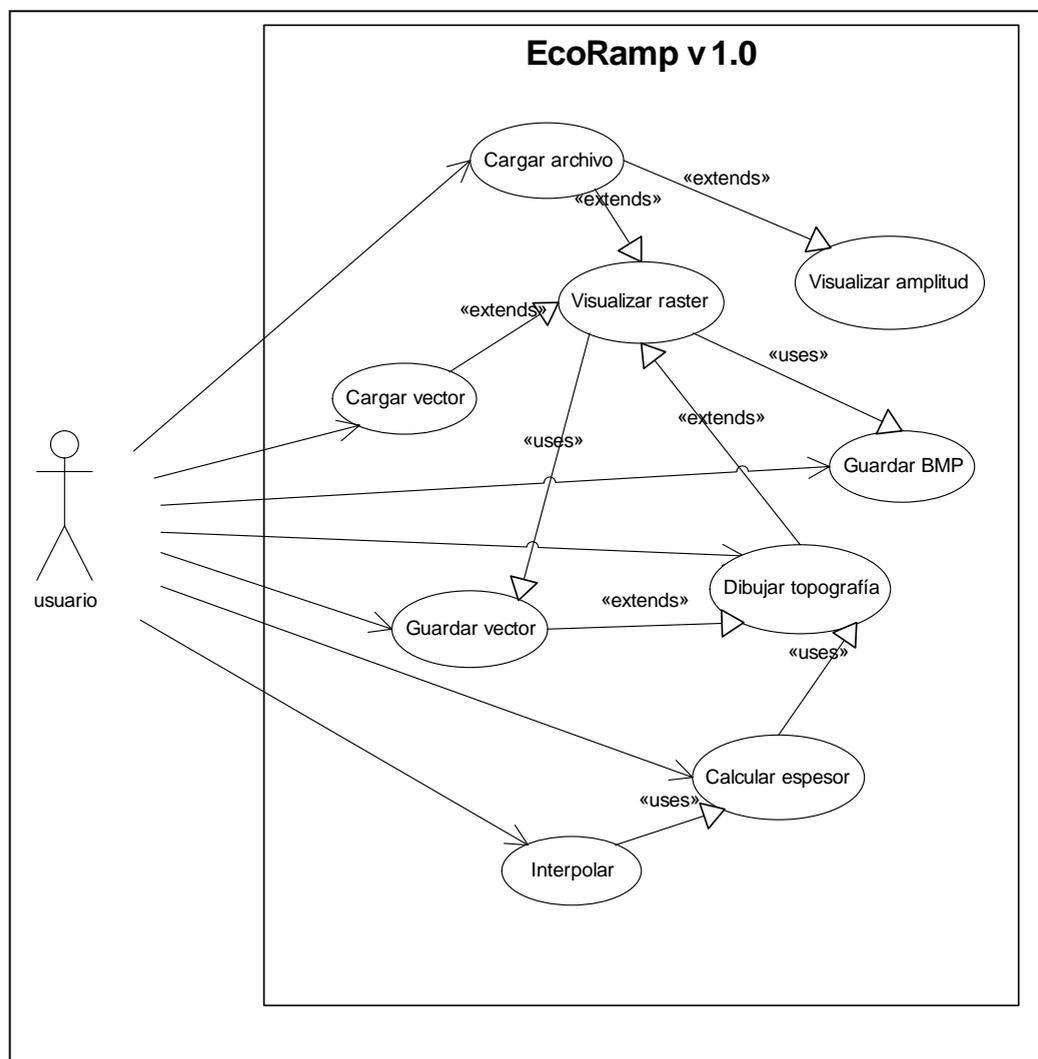


Fig. 5.2: Diagrama de casos de uso para la aplicación de procesamiento de datos de radar (EcoRamp v1.0).

Al seleccionar **abrir archivo** se ejecutan las acciones presentadas en el diagrama de la Fig. 5.3, los datos de amplitud son guardados en una matriz de NxM generada dinámicamente dependiendo del tamaño del archivo. **Raster** genera una nueva ventana

con la imagen raster, asignando cada valor de amplitud contenido en el arreglo de NxM a un valor de intensidad en una imagen de NxM.

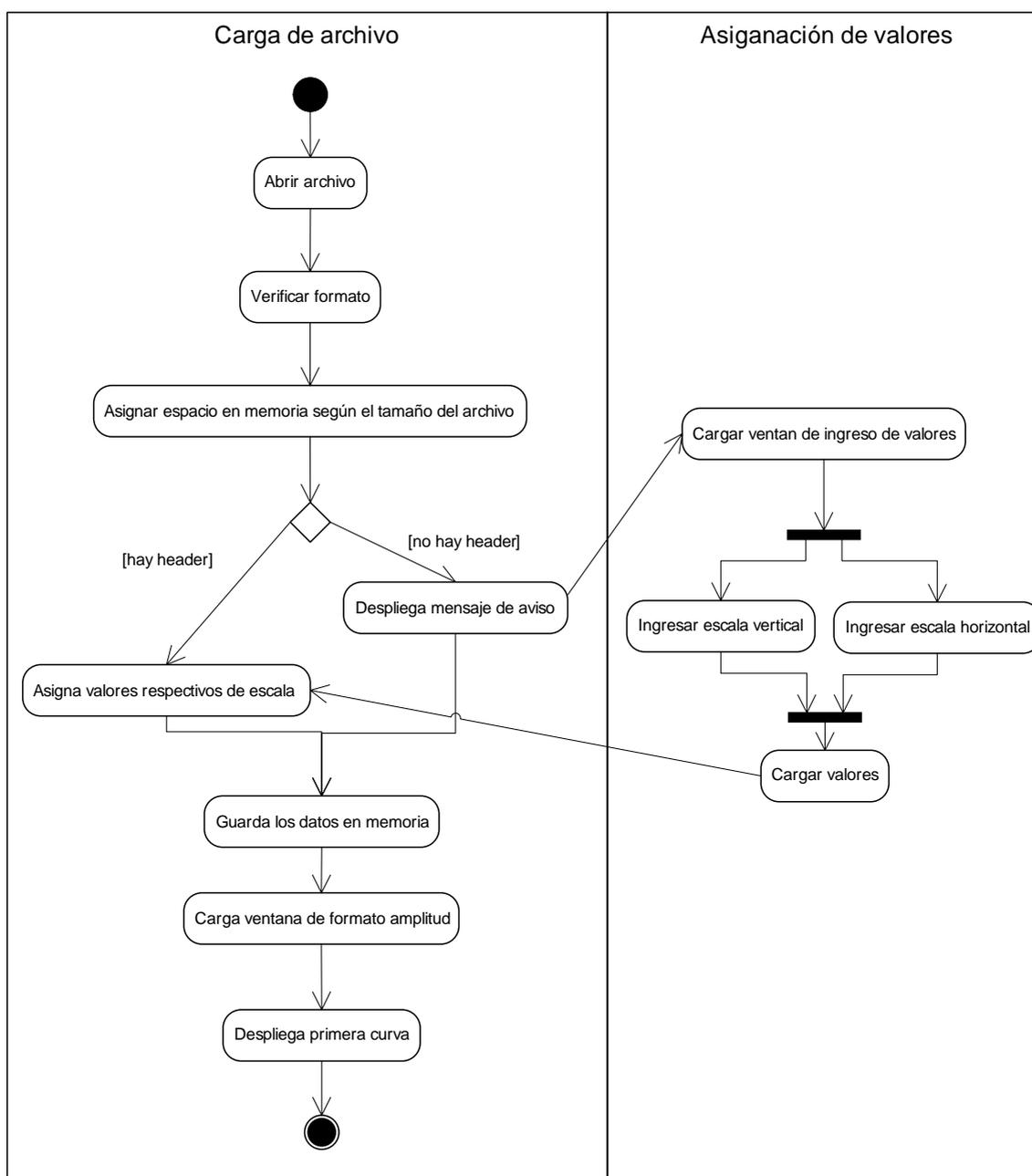


Fig. 5.3: Diagrama de bloques de la acción abrir archivo.

Dibujar topografía interactúa con la imagen raster permitiendo el dibujo de los vectores superficial y subglaciar, para posteriormente hacer el cálculo de espesor (Fig. 5.4).

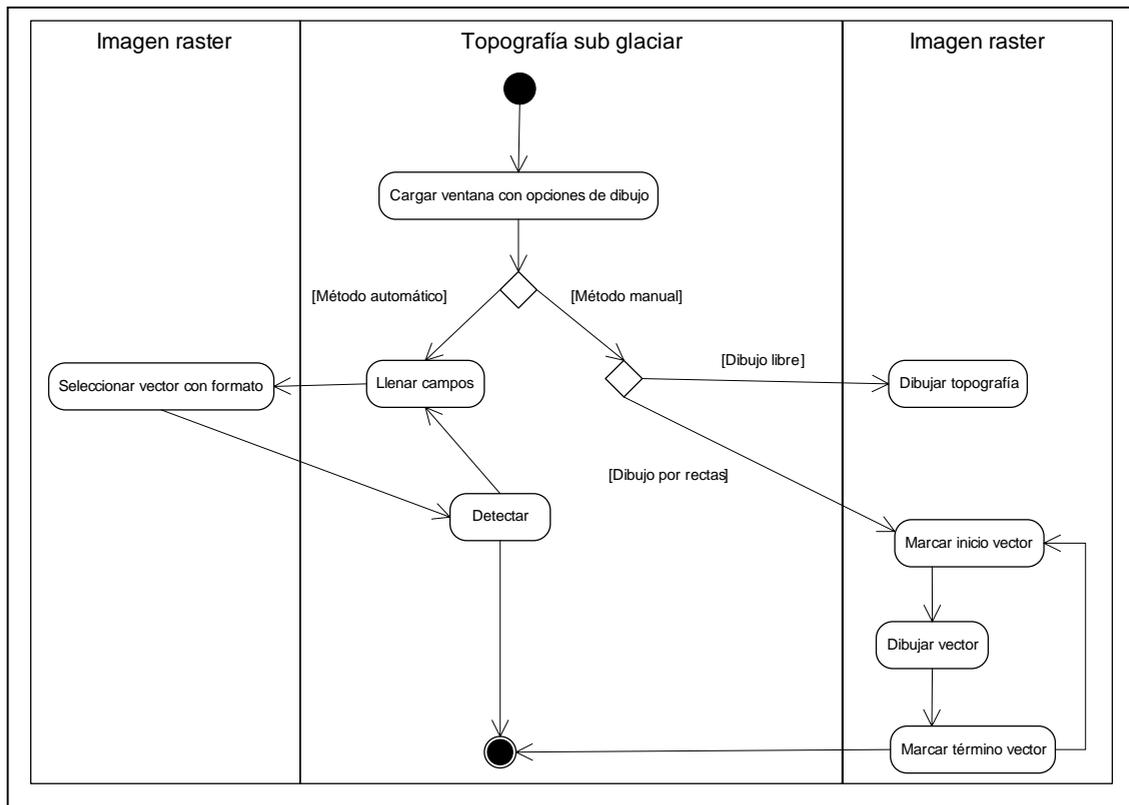


Fig. 5.4: Diagrama de actividades para el dibujo de la topografía.

Calcular espesor (Fig. 5.5) reconoce la topografía dibujada, y calcula la distancia en píxeles por traza que existe entre la topografía superficial y la topografía subglaciar para luego transformarla a tiempo (Ecuación 2.2) y posteriormente a espesor (Ecuación 2.1).

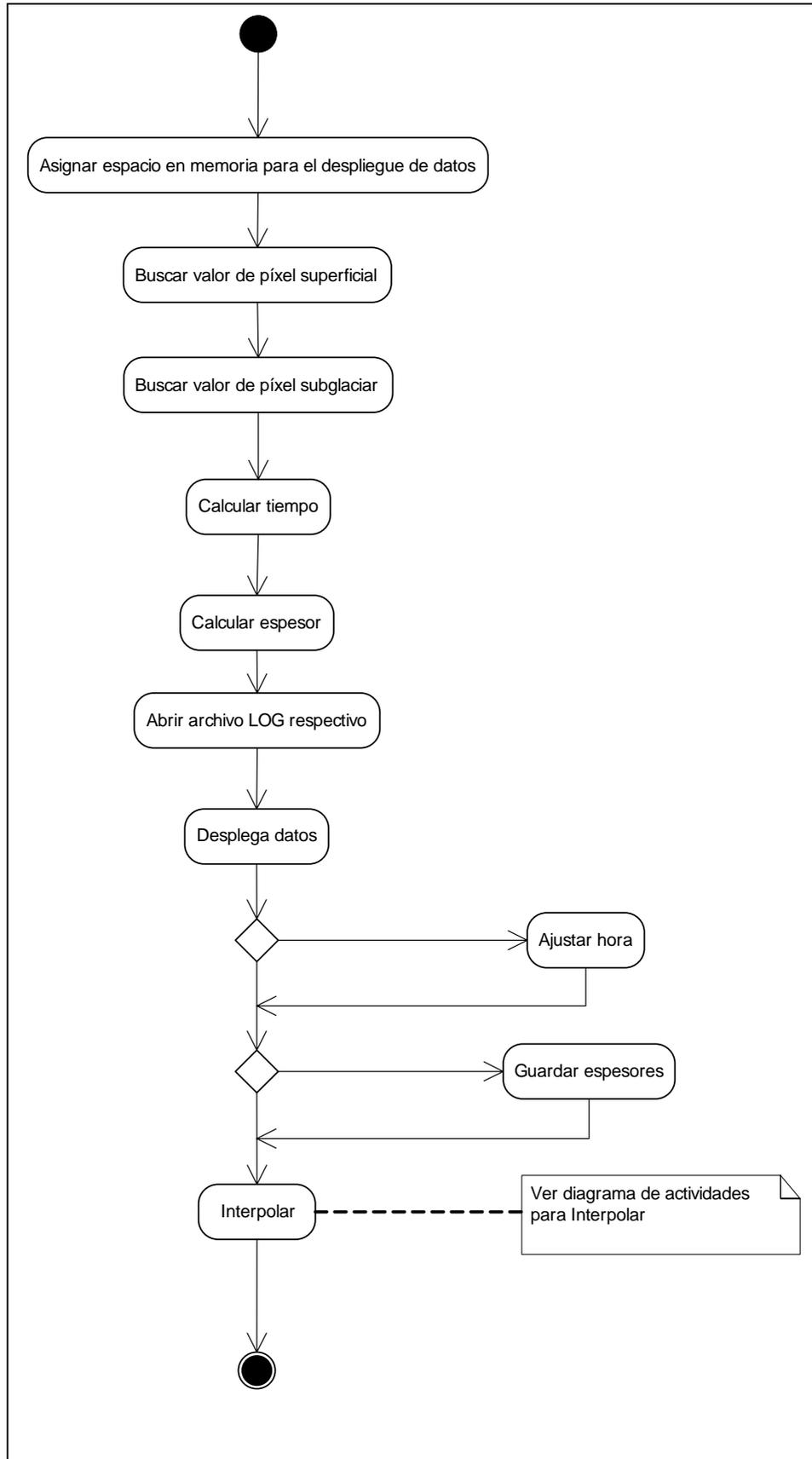


Fig. 5.5: Diagrama de actividades para el cálculo de espesor.

5.2.1 Despliegue de datos

Los datos pueden ser desplegados en formato raster según el diagrama de la Figura 5.6.

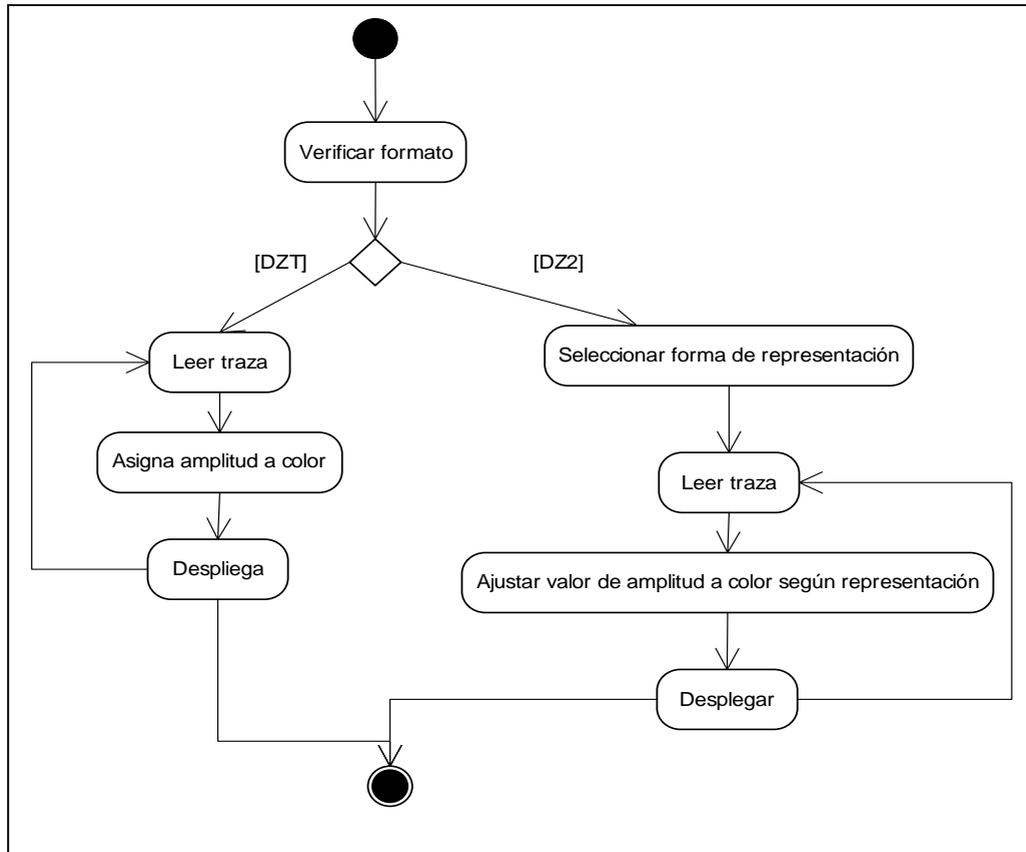


Fig. 5.6: Diagrama de actividad de representación en formato raster.

5.2.2 Procesamiento de imagen raster

La modificación de contraste se puede realizar según el diagrama de la Figura 5.8.

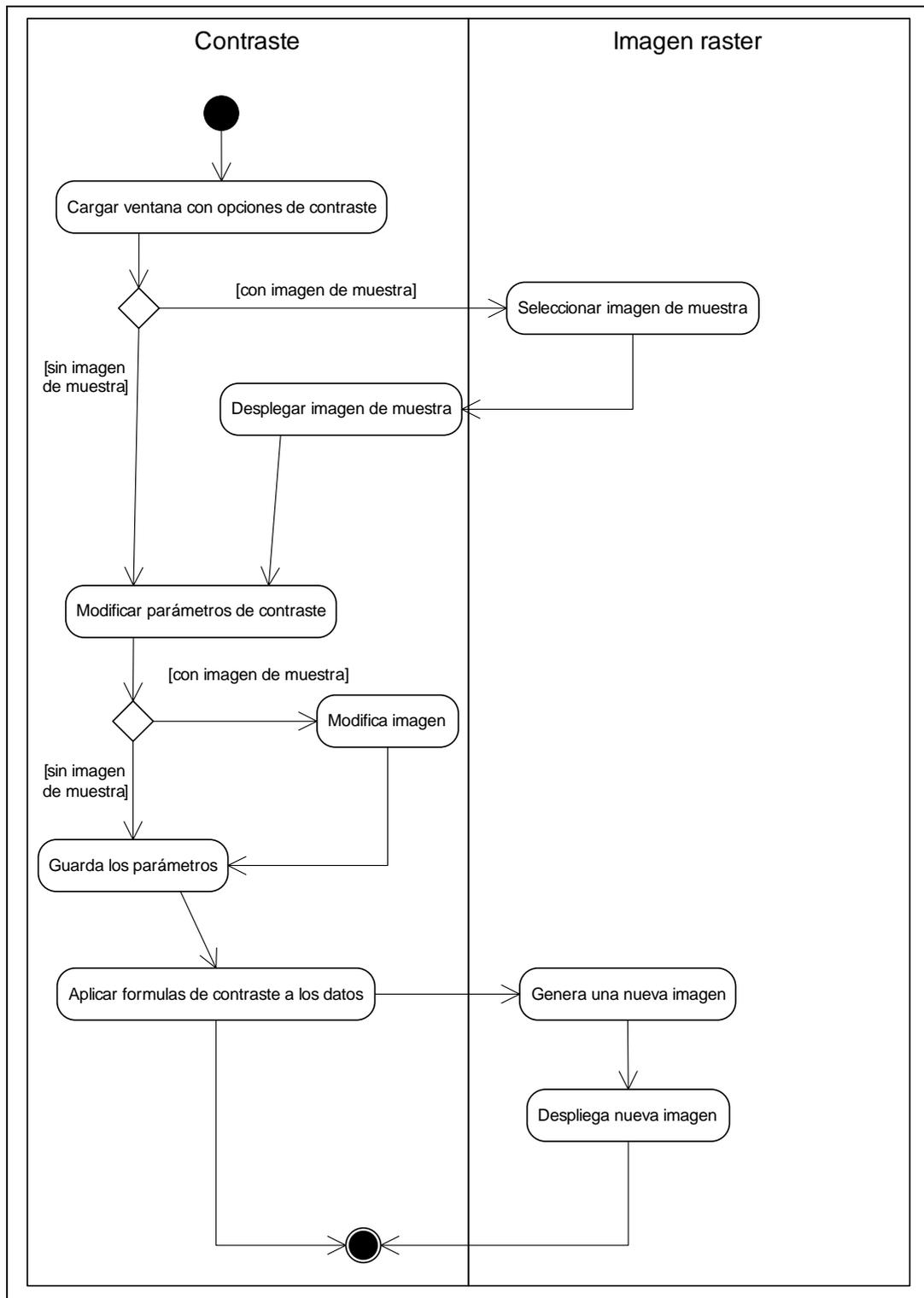


Fig. 5. 7: Diagrama de actividad para el proceso de modificación de contraste

5.2.3 Integración de los datos GPS

La integración de los datos GPS para obtener los espesores georeferenciados, corresponde al proceso de interpolación que se muestra en el diagrama de actividad de la Figura 5.8.

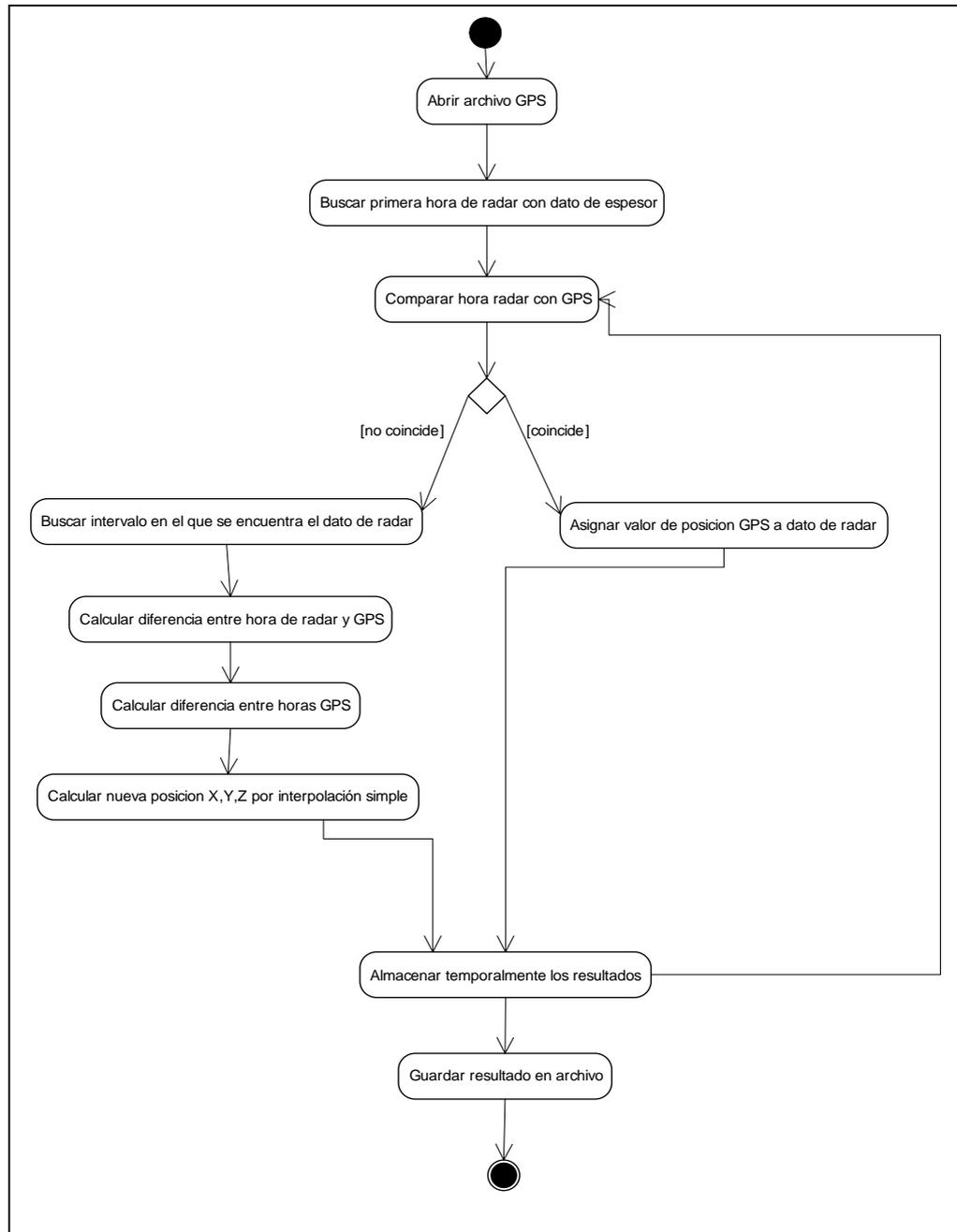


Fig. 5.8: Diagrama de actividad para el proceso de interpolación de datos de radar con GPS.

5.3 Presentación de la aplicación de procesamiento ECORAMP v1.0

5.3.1 Interfaz principal de ECORAMP v1.0

Al cargar la aplicación “EcoRamp v1.0” la primera ventana que se ve es la que se muestra a continuación (Fig. 5.9).

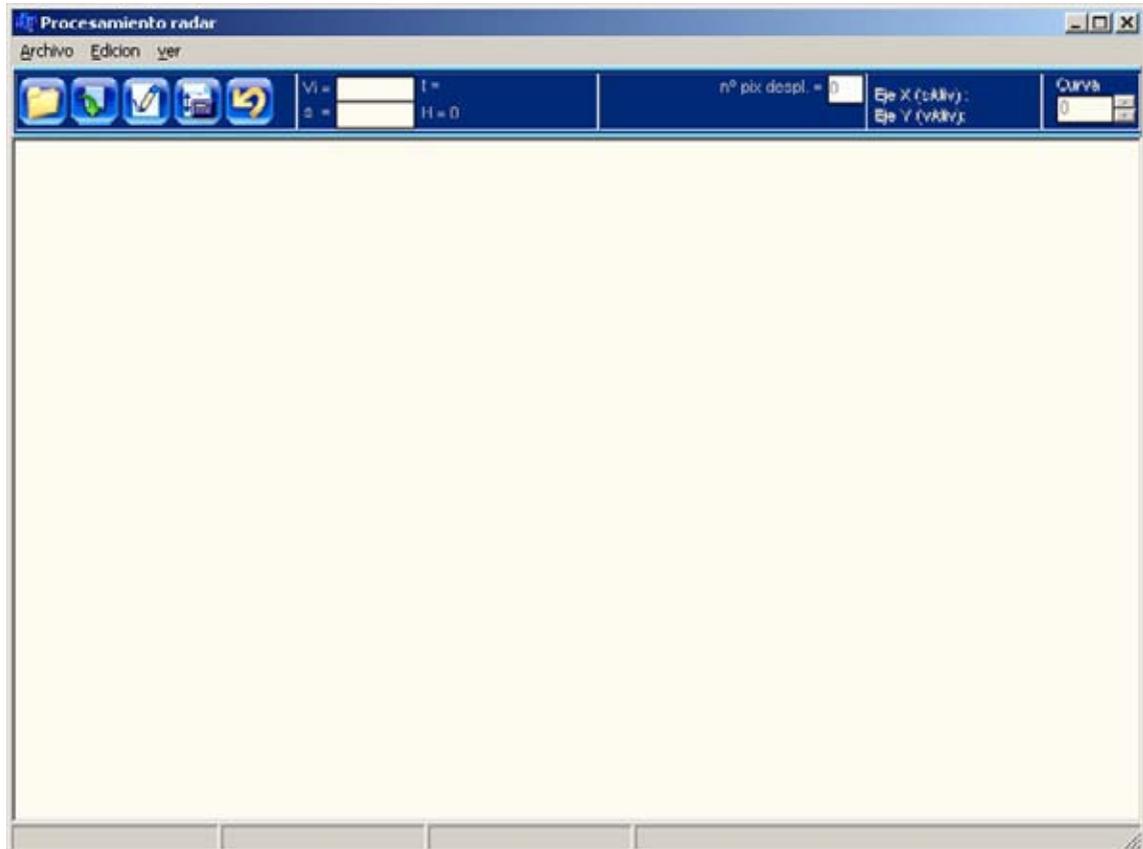


Fig. 5.9: Ventana principal de ECORAMP V1.0.

En la barra de acceso rápido de la aplicación ECORAMP V1.0 tenemos los siguientes botones:



Botón **Abrir**, permite cargar un archivo DZT o DZ2, es lo mismo que presionar en el menú **Archivo** → **Abrir**.



Botón **Raster**, una vez abierto el archivo presionando este botón se pueden desplegar los datos en formato raster, es lo mismo que presionar el menú **Ver** → **Raster**.



Botón **Dibujar topografía**, presionando este botón se carga una ventana que

permite dibujar la topografía con la herramienta diseñada para dicha acción.



Botón **Calcular espesor**, una vez que se tenga dibujada la topografía, presionando este botón se calculan automáticamente los espesores del perfil y se despliegan en la ventana los resultados.

Botón **cambiar**, al aplicar los algoritmos de modificación de contraste y



suavizado se modifica la imagen, este botón nos permite cambiar entre la imagen modificada y la original.

Dentro del menú aparecen otras funcionalidades que se describen a continuación, la estructura del menú se muestra en la figura 5.10.

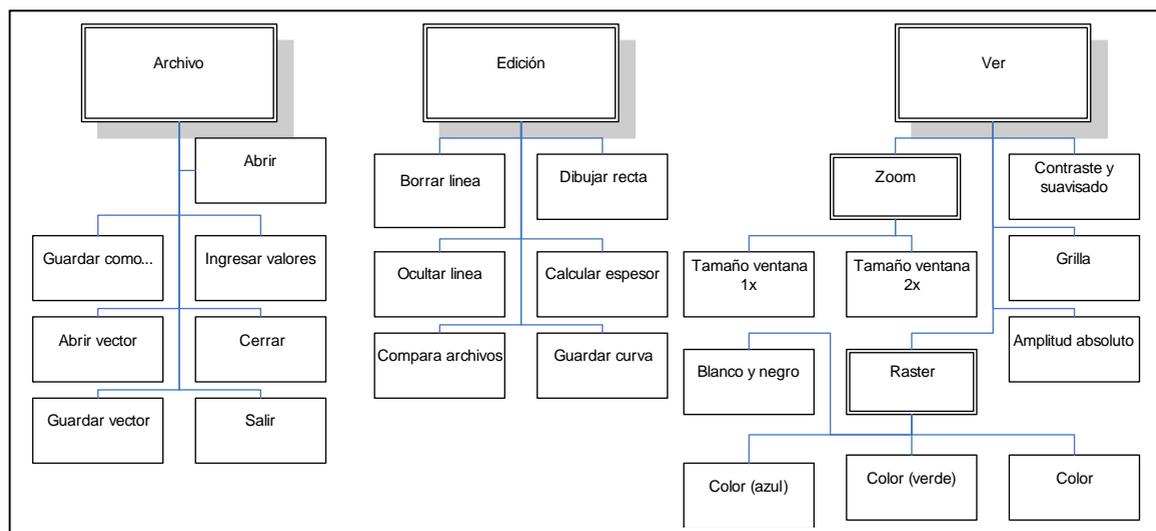


Fig. 5.10: Menú de la aplicación ECORAMP V1.0.

Dentro del menú **Archivo** se encuentra **Abrir**, que permite cargar un archivo, lo mismo que hace el botón abrir de la barra de acceso rápido. **Guardar como...**, permite guardar la imagen raster como imagen en formato BMP. **Ingresar valores**, en el caso de que el header del archivo no sea conocido, se deberán ingresar los valores para las divisiones de los ejes X e Y en forma manual. **Guardar vector**, cuando se digitaliza la imagen raster con la topografía del fondo y de la señal aérea, existe la posibilidad de guardar este vector. **Abrir vector**, abre el vector de topografía superficial y basal

previamente guardado. **Cerrar**, permite cerrar el archivo, la aplicación sólo puede tener un archivo abierto, para abrir otro archivo es necesario cerrar el que está abierto, o cargar nuevamente la aplicación y dentro de ésta abrir otro archivo. **Salir**, cierra la aplicación EcoRamp v.1.0.

En el menú **Edición** se puede encontrar: **Borrar línea**, permite borrar una línea hecha sobre la imagen raster seleccionando el área sobre la cual queremos borrar, para poder hacer esto la ventana **Topografía subglaciar...** (que se carga con el botón **Dibujar topografía** de la barra de acceso rápido) debe estar abierta. **Dibujar recta**, permite dibujar una recta horizontal sobre la imagen raster. **Ocultar líneas**, oculta las líneas de topografía dibujadas. **Calcular espesor**, hace lo mismo que el botón de acceso rápido **Calcular espesor**. **Compara archivos**, carga una nueva ventana en la cual se puede elegir la carpeta con los archivos de los resultados y calcula automáticamente las intersecciones de las diferentes mediciones para así poder calcular el error. **Guardar curva**, permite guardar la curva que actualmente se está viendo en la ventana amplitud, la guarda en formato ASCII.

El menú **Ver** contiene: **Contraste y suavizado**, carga una ventana mediante la cual se pueden cambiar en forma interactiva los valores de contraste, y también se puede suavizar la imagen. **Zoom (Tamaño ventana 1x)**, carga una ventana en la cual podemos ver una ampliación de la imagen raster o de la imagen en formato amplitud. **Zoom (Tamaño ventana 2x)**, carga una ventana del doble del tamaño de la ventana anterior que muestra un zoom según el desplazamiento de Mouse. **Raster**, abre una nueva ventana con los datos en formato raster, por defecto se abre en **blanco y negro**. **Raster → Color (azul)**, cambia la imagen raster en blanco y negro a colores centrado en azul (capítulo 4). **Raster → Color (verde)**, cambia la imagen raster a color centrado en verde. **Raster → Color**, muestra la imagen raster en colores con tonalidades entre verde y rojo (capítulo 4). **Grilla**, una vez hecha la escala vertical en la imagen raster se puede

dibujar una grilla siguiendo los valores de la regla. **Amplitud absoluta**, muestra el formato amplitud con sus valores absolutos.

5.3.2 Despliegue de datos en ECORAMP V1.0

Los datos se pueden desplegar tanto en formato amplitud, como en formato raster, en ambos casos se despliega una ventana que permite trabajar con los datos según las ventajas que ofrece cada una de las representaciones.

5.3.2.1 Despliegue en formato amplitud

Lo primero es abrir un archivo presionando el botón **Abrir** o seleccionando el menú **Archivo**→**Abrir**, con esto se cargará una ventana automáticamente dentro de la ventana principal con la imagen de la primera traza del archivo en formato amplitud (Fig. 5.11), las trazas se pueden cambiar seleccionando o escribiendo el número de la traza en el campo dispuesto para esto. La cantidad de trazas que tiene el archivo aparecen en la barra de estado, esquina inferior izquierda de la ventana principal.

Al pasar el mouse sobre la imagen en formato amplitud se puede ver en el segundo campo de la barra de estado, los valores correspondientes al número de punto (X) y a la amplitud en 8 bits que éste tiene.

Los archivos en formato DZ2 pueden ser ampliados seleccionando con el botón derecho del mouse el área en la cual se quiere obtener mayor resolución, esto abre una nueva ventana que muestra el área seleccionada con mayor detalle.

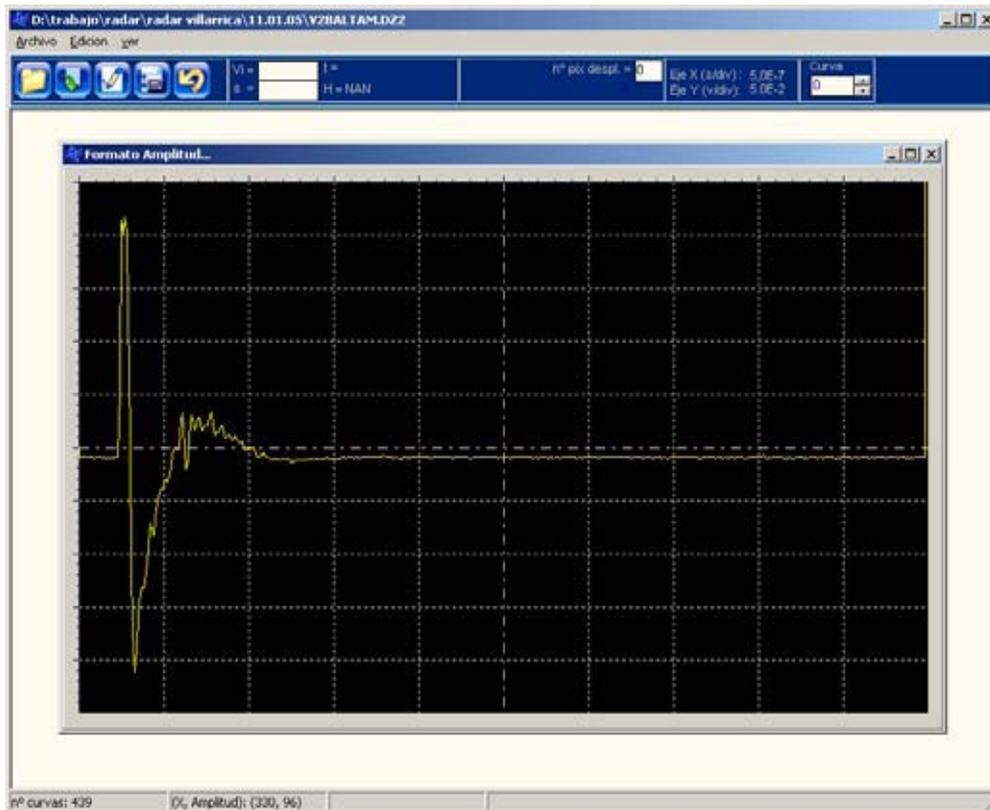


Fig. 5.11: Ventana en formato amplitud en la aplicación EcoRamp v1.0.

5.3.2.2 Despliegue en formato raster

Al abrir el archivo se cargan los datos en formato amplitud, para poder ver los datos en formato raster se debe presionar el botón **Raster** de la barra de acceso rápido o seleccionar el menú **Ver→Raster**, esto carga una nueva ventana dentro de la aplicación que muestra los datos en formato raster (Fig. 5.12) en escala de grises.

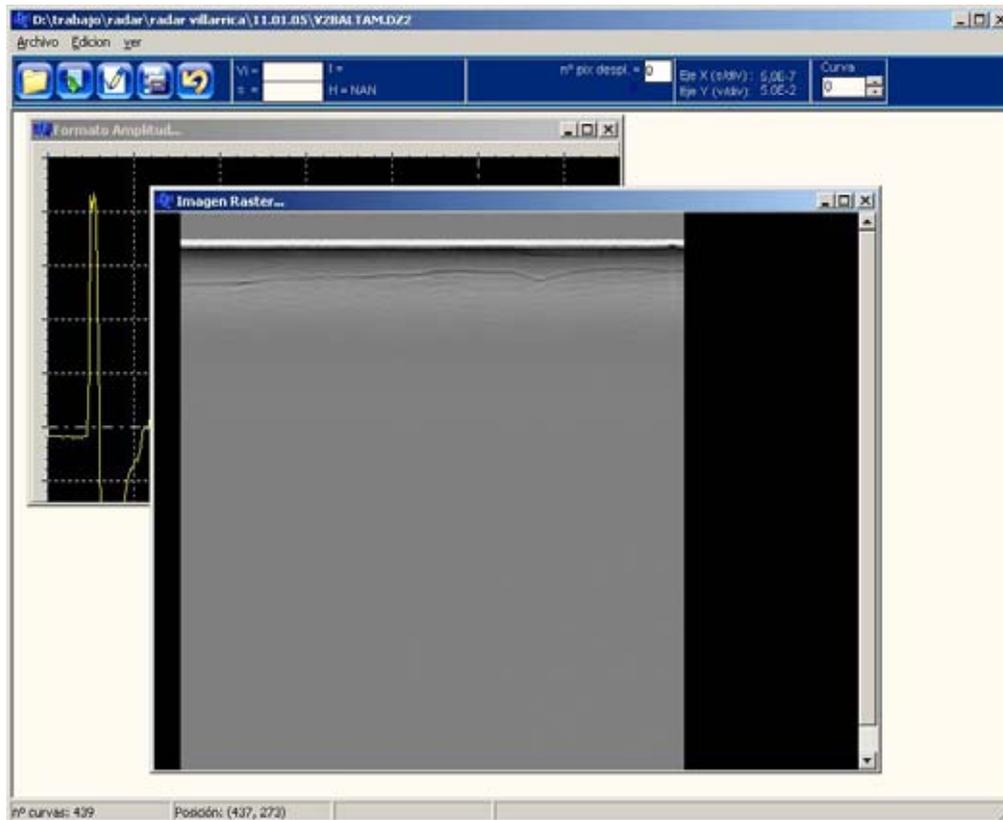


Fig. 5.12: EcoRamp v1.0 con ventana de formato raster.

Al desplazar el mouse sobre la imagen raster, la barra de estado muestra la posición en la cual está, **posición (traza, punto)**. La imagen raster puede ser desplegada en colores, para esto se debe seleccionar el menú **Ver→Raster** y elegir cualquiera de la cuatro opciones disponibles. La opción **Blanco y negro** es la única opción en EcoRamp que tienen los datos cuando son cargados de un archivo DZT, ya que en este caso los datos vienen solo en 8 bits.

5.3.3 Procesamiento de imagen raster

Para la modificación del contraste se debe seleccionar el menú **Ver→Contraste y suavizado**, esto carga una nueva ventana (Fig. 5.13) que permite modificar de forma interactiva los valores de contraste para la imagen.



Fig. 5.13: Ventana de modificación de contraste y suavizado.

Se puede trabajar con una imagen de muestra (recomendado, para poder ver los cambios) o simplemente modificando los valores.

Para ver la imagen de muestra se debe seleccionar en la imagen raster el área que se quiere ver con más detalle, una vez hecha la selección automáticamente se carga la imagen de muestra en la ventana **Cambiar contraste**.

El contraste se modifica desplazando las barras dispuestas para esto en los cuadros **Ampliación de contraste** y **Desplazamiento de contraste**. Los algoritmos de modificación de contraste implementados se pueden aplicar por separado (seleccionando la opción **Original** en **Aplicar sobre...**) o se pueden aplicar combinados (seleccionando la opción **Modificado** en **Aplicar sobre...**). En la Figura 5.14 se puede ver una imagen raster original (5.14.a) y la imagen con modificación de contraste (5.14.b).

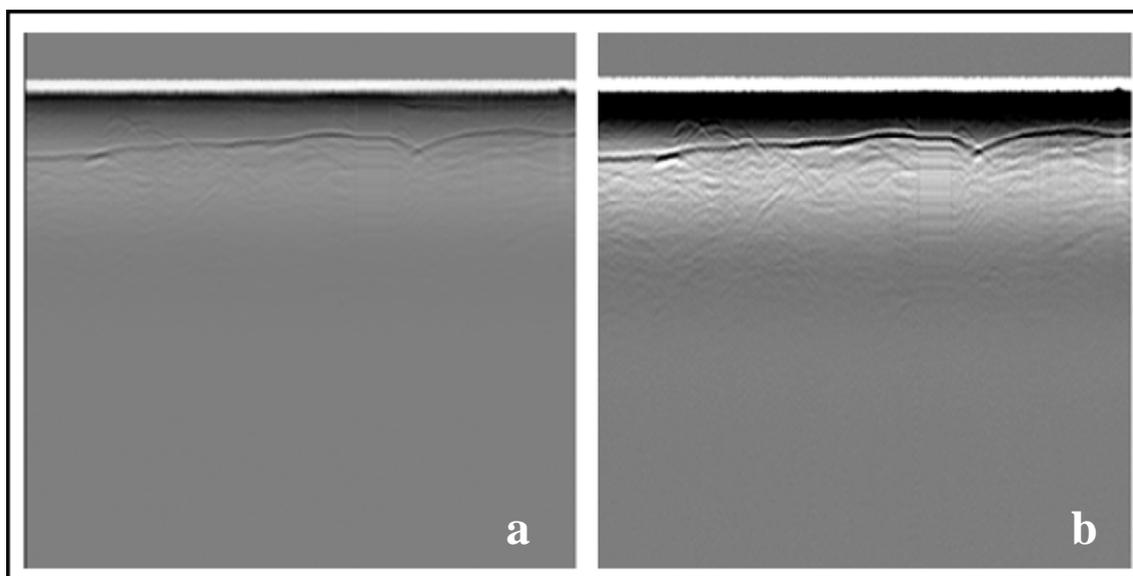


Fig. 5.14: Imagen raster original (a) y con modificación de contraste (b).

El algoritmo de suavizado se aplica presionando el botón **Suavizar** de la ventana de modificación de contraste, este algoritmo suaviza la imagen de acuerdo a la mediana de una matriz de 3x3 píxeles.

5.3.4 Cálculo de espesor

El cálculo de espesor se puede hacer en la imagen en formato amplitud seleccionando el espesor traza por traza o a través de la imagen raster dibujando la topografía superficial y subglaciar. Se debe definir cual es la topografía presente en la imagen raster, la definición de ésta queda a criterio del usuario.

5.3.4.1 Dibujo de la topografía subglaciar

Presionando el botón **Dibujar topografía** de la barra de acceso rápido, se despliega una ventana (Fig. 5.15) con opciones que permiten dibujar la topografía.

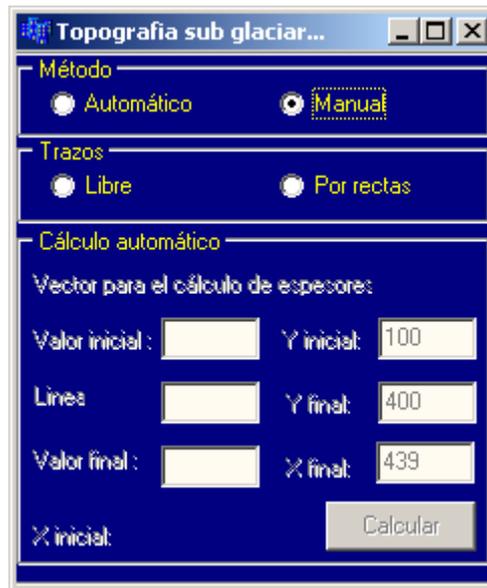


Fig. 5.15: Ventana para dibujar la topografía.

Se implementaron dos formas de trabajo: método **Automático**, este habilita todas las opciones del cuadro **Cálculo automático**, que permiten delimitar el área de trabajo del algoritmo automático de detección de fondo. El modo **Manual**, implica que la topografía subglaciar y superficial debe ser dibujada, para esto se han implementado dos opciones de trabajo:

Manual por Trazos libres: Permite dibujar libremente la topografía (Fig. 5.16). Es importante destacar que para poder dibujar, la ventana **Topografía sub glaciar...** debe estar siempre abierta.

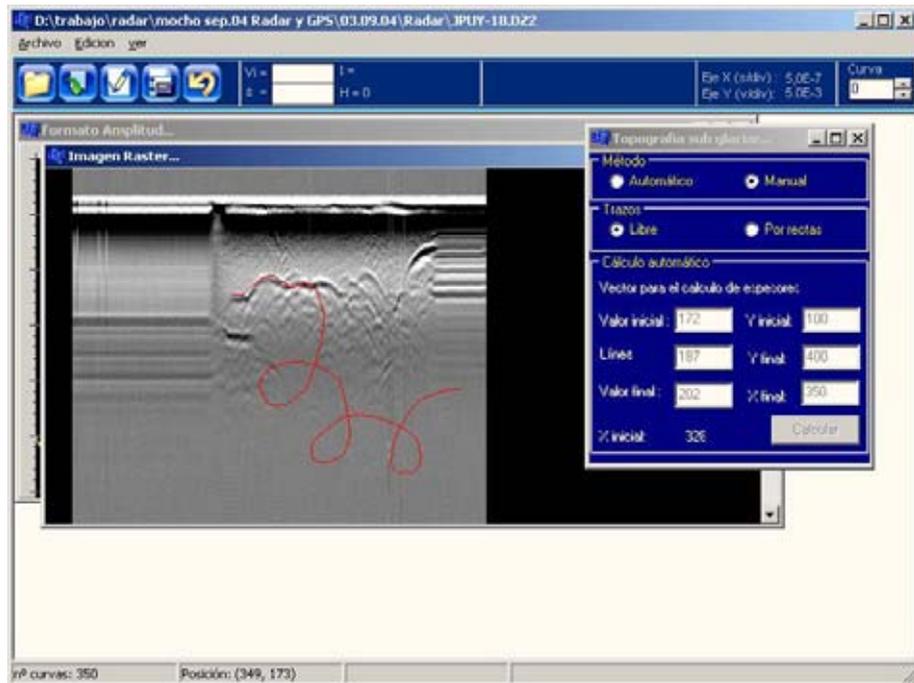


Fig. 5.16: Ventana con imagen raster y dibujo con método manual por trazos libres.

Manual Por Rectas: En esta forma de trabajo el dibujo de la topografía se hace a través de rectas (Fig. 5.17).



Fig. 5.17: Ventana con imagen raster y dibujo de topografía superficial y subglaciar.

3.5 Cálculo de espesor en formato amplitud

Permite seleccionar en el formato amplitud el espesor en cada una de las trazas. Los cálculos de espesores en el formato amplitud son sólo referenciales, aunque también aportan al dibujo de la topografía y a la validación de ésta, ya que la selección hecha en el raster (Fig. 5.18) se ve reflejada en la imagen en formato amplitud y viceversa.

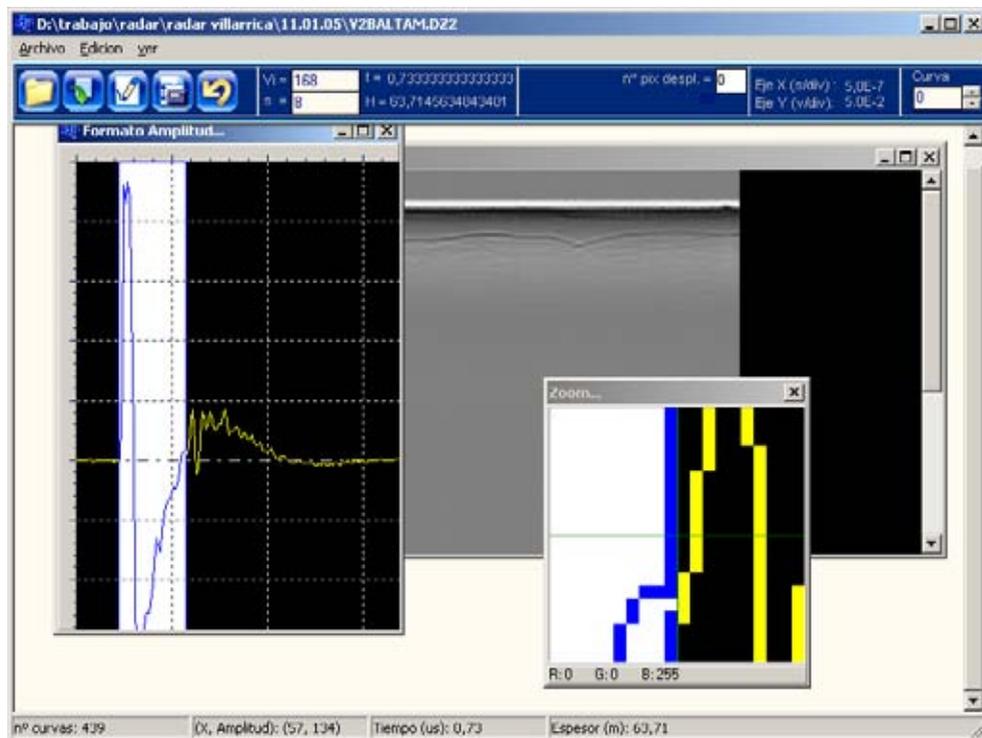


Fig. 5.18: Ventana de EcoRamp v1.0 con imagen amplitud y selección de espesor.

5.3.6 Cálculo de espesor en formato raster

Dentro de la imagen raster tenemos otras utilidades: regla y la grilla, que ayudan a obtener una mejor visión.

Visualización de regla: la visualización de la regla se hace de manera interactiva presionando sobre la franja negra ubicada en el extremo izquierdo de la imagen raster. Se debe presionar a la altura del inicio del pulso aéreo, aunque también este valor se

puede ingresar manualmente en la ventana que aparecerá después de haber hecho esto (Fig. 5.19).



Fig. 5.19: Ventana para dibujo de la regla.

El **valor inicial** se carga automáticamente cuando se presiona sobre la franja izquierda. Este valor indica la posición en la cual quedará el valor cero de la regla. El campo **Nº de separaciones** nos indica la cantidad de valores que la regla mostrará, el valor máximo es 50, mayor cantidad de valores no podrán ser diferenciados dentro de la regla.

Visualización de grilla: La grilla se puede dibujar solo si se ha hecho la regla previamente, y para poder visualizarla debemos presionar en el menú **Ver→Grilla**.

Una vez dibujada la topografía se puede proceder al cálculo de espesor, pero antes de esto debemos llenar los campos de velocidad de desplazamiento de onda en el hielo V_i en $m/\mu s$ y la separación entre las antenas t en metros, también se deben tener los valores de los ejes, que si no han sido reconocidos automáticamente, se deben llenar en el menú **Archivo→Ingresar valores**.

Para hacer el cálculo de espesor sólo se debe presionar el botón **Calcular espesor** o seleccionar el menú **Edición→Calcular espesor**, con esto se calculan automáticamente los valores de espesor a partir de la topografía previamente dibujada. Luego aparece una ventana (Fig. 5.20) donde debemos seleccionar el archivo *.LOG asociado al archivo raster. Después de esto se abre una nueva ventana (Fig. 5.21) con los datos de espesor presentados en una matriz.

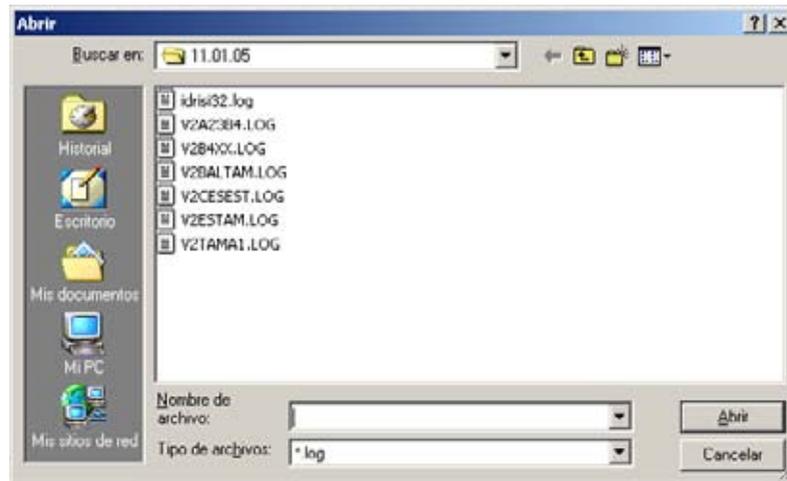


Fig. 5.20: Ventana para cargar el archivo *.LOG asociado.

ID	Pixel sup	Pixel inf	Espesor m	Hora
39	25	58	59,22507577	12:32:26
40	25	58	59,22507577	12:32:30
41	25	58	59,22507577	12:32:34
42	20	58	59,22507577	12:32:38
43	25	58	59,22507577	12:32:42
44	25	50	50,22507577	12:32:46
45	25	58	59,22507577	12:32:52
46	25	58	59,22507577	12:32:56
47	25	56	59,22507577	12:33:00
48	25	58	59,22507577	12:33:04
49	25	50	60,90879739	12:33:08
50	25	59	60,90879739	12:33:13
51	25	59	60,90879739	12:33:17
52	25	59	60,90879739	12:33:21
53	25	59	60,90879739	12:33:25
54	20	59	60,90879739	12:33:29

Fig. 5.21: Ventana con los valores de espesor.

Presionando el botón **Guardar** se pueden almacenar estos datos en un archivo de texto en columnas separadas por un espacio.

5.3.7 Integración de los datos GPS

La última de las etapas del procesamiento de datos es la integración de los datos GPS para obtener los espesores georeferenciados. Para esto debemos presionar el botón >> de la ventana que se ve en la Figura 5.21. Con esto se despliega la parte de la ventana donde se deben ingresar los datos GPS (Fig. 5.22).

The screenshot shows a software window titled "Resultados...". It contains two tables. The left table has columns: ID, Pixel sup., Pixel inf., Espesor m., and Hora. The right table has columns: Date, HH:MM:SS.SSS, North(m), East(m), and Up(m). Below the tables are control elements: "Ajustar hora" with an "Ajustar" button and a time input field; "Separador de columnas:" with an "Abrir archivo GPS" button and a character input field; and "Columnas a interpolar" with dropdown menus for X, Y, and Z, and an "Interpolar" button.

ID	Pixel sup.	Pixel inf.	Espesor m.	Hora	Date	HH:MM:SS.SSS	North(m)	East(m)	Up(m)
84	25	57	57,54113658	12:35:36	3,Sep,04	14:50:52,000	5575664,137	242911,348	2006,183
85	25	57	57,54113658	12:35:40	3,Sep,04	14:50:54,000	5575664,139	242911,346	2006,192
86	25	57	57,54113658	12:35:45	3,Sep,04	14:50:56,000	5575664,143	242911,346	2006,193
87	25	57	57,54113658	12:35:49	3,Sep,04	14:50:58,000	5575664,144	242911,349	2006,196
88	25	57	57,54113658	12:35:53	3,Sep,04	14:51:00,000	5575664,139	242911,352	2006,190
89	25	57	57,54113658	12:35:57	3,Sep,04	14:51:02,000	5575664,139	242911,350	2006,185
90	25	57	57,54113658	12:36:02	3,Sep,04	14:51:04,000	5575664,136	242911,347	2006,189
91	25	57	57,54113658	12:36:07	3,Sep,04	14:51:06,000	5575664,134	242911,342	2006,205
92	25	57	57,54113658	12:36:11	3,Sep,04	14:51:08,000	5575664,128	242911,345	2006,194
93	25	57	57,54113658	12:36:15	3,Sep,04	14:51:10,000	5575664,125	242911,342	2006,194
94	25	57	57,54113658	12:36:19	3,Sep,04	14:51:12,000	5575664,127	242911,343	2006,194
95	25	57	57,54113658	12:36:23	3,Sep,04	14:51:14,000	5575664,133	242911,342	2006,181
96	25	57	57,54113658	12:36:27	3,Sep,04	14:51:16,000	5575664,134	242911,346	2006,183
97	25	57	57,54113658	12:36:31	3,Sep,04	14:51:18,000	5575664,123	242911,344	2006,190
98	25	57	57,54113658	12:36:36	3,Sep,04	14:51:20,000	5575664,127	242911,341	2006,189
99	25	57	57,54113658	12:36:40	3,Sep,04	14:51:22,000	5575664,120	242911,300	2006,107

Fig. 5.22: Ventana de interpolación de los datos de radar con los datos GPS.

Los datos GPS deben estar en columnas con algún separador y en formato ASCII para que puedan ser reconocidos por la aplicación ECORAMP V1.0. Los datos mínimos requeridos para poder llevar a cabo el proceso de interpolación son: North, East y Up en proyección UTM, la hora y la fecha. Estos datos GPS pueden ser cargados presionando el botón **Abrir archivo GPS** que reconocerá como separador de columnas el caracter que se encuentra en el campo **Separador de columnas**.

En el caso que la hora de radar no haya sido ajustada en terreno a la hora GPS es necesario ajustar en post-proceso la hora de radar a la hora GPS. Para esto debemos ingresar la cantidad de horas que se sumarán a las horas ya existentes en el campo **Ajustar hora**. Luego presionando el botón **Ajustar** aparece un mensaje que indica la cantidad de horas que se sumarán. Si se acepta, se suman las horas, si no las horas de radar quedan iguales.

Se deben seleccionar las columnas de hora, fecha, X, Y, Z necesarias para la interpolación. Finalmente presionando el botón interpolar se lleva a cabo la interpolación, entregando como resultado un archivo de texto con los datos puestos en columnas separados por “,” (coma y espacio).

Las columnas que entrega como resultado son:

ID radar, Fecha, Hora GPS, Hora Radar, Espesor, East(m), North(m), Up(m) , Down(m)

Donde Up(m) es la altura superficial y Down(m) es la altura subglaciar.

5.3.8 Cálculo de errores

Para poder verificar si se hizo un buen procesamiento de datos o si se hizo una buena elección de la topografía subglaciar, se implementó dentro de la aplicación ECORAMP V1.0 una utilidad que compara todos los archivos de resultados que verifica todos los puntos que estén separados a un distancia X ingresada por el usuario. Esto se puede hacer seleccionando el menú **Edición→Comparar archivos** que carga la ventana que se ve en la Figura 5.23.

En esta ventana se selecciona la carpeta donde están los archivos con los resultados, que deben tener la extensión *.TXT y todos deben tener igual formato: columnas separadas por coma (“,”, aunque también puede ser otro separador que el usuario deberá ingresar en **Separador columnas**) y como separador decimal deben tener un punto. Además dentro de la carpeta se recomienda que sólo estén los archivos que se van a comparar.

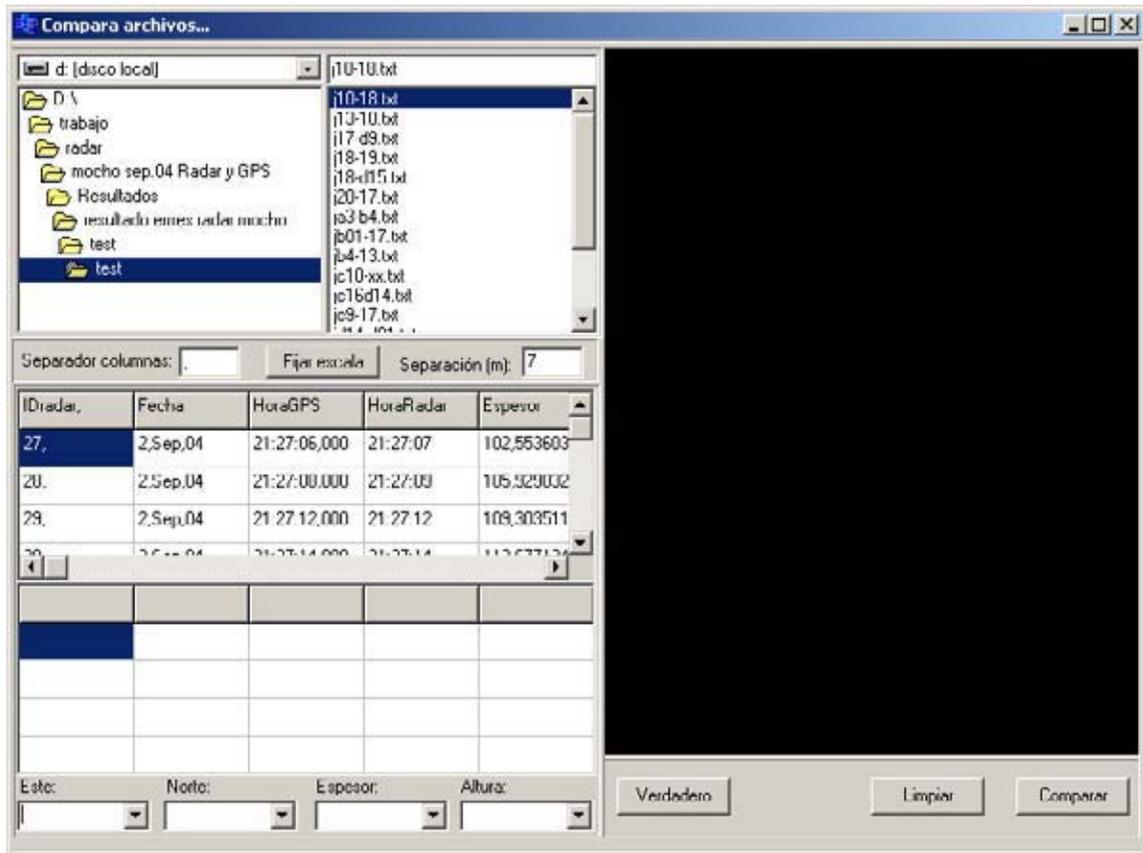


Fig. 5.23: Ventana para la obtención de las diferencias en espesor de los archivos.

Se selecciona la carpeta donde están los archivos, luego se selecciona uno de los archivos, presionando sobre su nombre, con esto se cargan las columnas en la matriz (matriz con datos en la Fig. 5.23), después se deben llenar los campos **Este**, **Norte**, **Espesor** y **Altura**, y también la cantidad de metros que debe haber entre los puntos que se van a comparar (campo **Separación (m)**). Luego se debe presionar el botón **Comparar** y se comenzara a hacer la comparación de los archivos, para obtener como resultado una lista de datos separados en columnas que contiene los siguiente valores: Archivo1, Archivo2, Este2, Norte2, Altura2, Espesor2, Este1, Norte1, Altura1, Espesor1, DeltaEspesor y DeltaAltura.

5.4 Conclusiones

El proceso de cálculo de espesores con la aplicación ECORAMP V1.0 en ambiente Windows resulta mucho más rápido que el proceso que se utilizaba antes. Además en EcoRamp se incorporan muchas funcionalidades que permiten un trabajo más detallado de los datos, sin realizar modificaciones previas de los archivos reduciendo la cantidad de etapas presentes en el método antiguo.

Como se ve en la imagen 5.24 las etapas de procesamiento se han integrado en una sola herramienta resultando ser más fácil y además más rápido que el proceso anterior (Fig. 5.1) que incluía una gran cantidad aplicaciones distintas para poder llegar al mismo resultado.

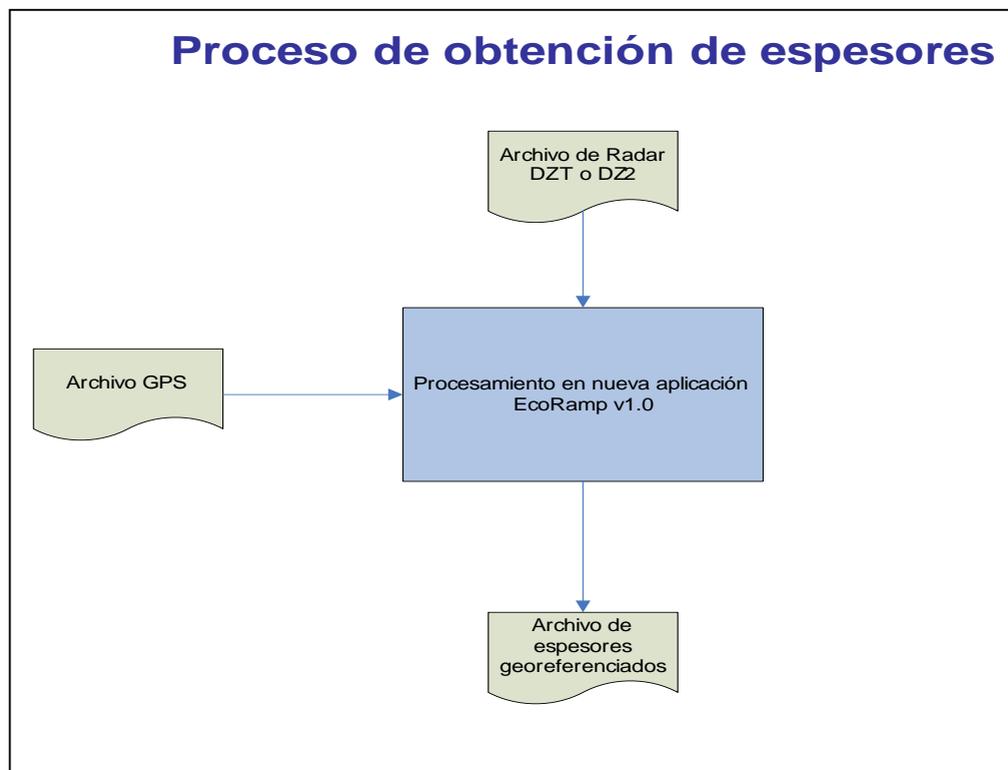


Fig. 5.24: Nuevo proceso de obtención de espesor.

Capítulo 6. Validación de los datos, conclusiones y desarrollos futuros.

6.1 Introducción

Se describe la validación de los resultados obtenidos con la aplicación ECORAMP V1.0, haciendo una comparación con resultados obtenidos con el procedimiento antiguo establecido en el LGCC-CECS a partir de distintas mediciones hechas en terreno. Se presentan las conclusiones generales de este trabajo para finalizar proponiendo futuros desarrollos posibles de efectuar para mejorar o complementar el trabajo aquí realizado.

6.2 Validación de los resultados obtenidos con la aplicación ECORAMP V1.0

Para la validación del cálculo de espesor se consideró el archivo n206n405.dzt adquirido por el LGCC-CECS en noviembre de 2002 en los alrededores de Base Carvajal, Isla Adelaida, Península Antártica y éste archivo se procesó con la aplicación ECORAMP V1.0 ingresando los mismos parámetros utilizados en el procesamiento original [Riv2001], con una velocidad de desplazamiento de la onda en el hielo de 170 m/ μ s y separación de antenas de 20 metros.

La Tabla 6.1 muestra los primeros 26 de 300 resultados obtenidos, donde se puede ver un delay de 29 correspondiendo el primer resultado a la curva 41. Estos valores fueron considerados al momento de hacer el cálculo de espesores en la aplicación ECORAMP V1.0.

La Figura 6.1 muestra el cálculo hecho para la curva 41, considerando un retardo de 29 y un tiempo de retorno de 2.026 μ s (como se puede ver sobre la ventana **zoom...** de la figura). Con estos parámetros el espesor obtenido en la aplicación ECORAMP V1.0 (Fig. 6.1) es de 177,65 metros, que es el mismo espesor se puede ver en la columna

espesor preliminar de la Tabla 6.1. correspondiente al procesamiento antiguo. Esto valida los resultados de la aplicación EcoRamp.

delat	escala tiempo	SEPARACION	20	VEL. ARI	300	VEL. HELIO	170	PERMITIVIDAD 3.47								ID	ESPESOR PRELIMINAR		
X(COLUM)	Y(FILAINVERSA)	TRUNCAY	-500j-to	TIEMPO	REDONDEA	ESPESOR	2	3	4	5	6	7							
40,5	370,5	370	101	2,02	41	177	177,08	177,08	177,08	177,08	177,08	177,08	41	177					
41,5	370,5	370	101	2,02	42	177	177,08	177,08	177,08	177,08	177,08	177,08	42	177					
42,5	371,5	371	100	2	43	175	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	43	175					
43,5	371,5	371	100	2	44	175	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	44	175					
44,5	371,5	371	100	2	45	175	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	45	175					
45,5	371,5	371	100	2	46	175	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	46	175					
46,5	371,5	371	100	2	47	175	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	47	175					
47,5	371,5	371	100	2	48	175	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	48	175					
48,5	371,5	371	100	2	49	175	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	49	175					
49,5	371,5	371	100	2	50	175	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	50	175					
50,5	371,5	371	100	2	51	175	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	51	175					
51,5	371,5	371	100	2	52	175	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	52	175					
52,5	371,5	371	100	2	53	175	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	53	175					
53,5	371,5	371	100	2	54	175	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	54	175					
54,5	371,5	371	100	2	55	175	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	55	175					
55,5	371,5	371	100	2	56	175	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	56	175					
56,5	371,5	371	100	2	57	175	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	57	175					
57,5	371,5	371	100	2	58	175	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	58	175					
58,5	371,5	371	100	2	59	175	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	59	175					
59,5	371,5	371	100	2	60	175	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	60	175					
60,5	371,5	371	100	2	61	175	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	61	175					
61,5	371,5	371	100	2	62	175	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	62	175					
62,5	371,5	371	100	2	63	175	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	63	175					
63,5	371,5	371	100	2	64	175	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	64	175					
64,5	371,5	371	100	2	65	175	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	65	175					
65,5	371,5	371	100	2	66	175	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	175,38	66	175					

Tabla 6.1: Primeros 26 espesores obtenidos en el procesamiento original del archivo n206n405.dzt de Base Carvajal.



Fig 6.1: Medición de espesor en la curva 41 del archivo n206n405.dzt, con los mismos parámetros del cálculo con el proceso anterior.

En la aplicación ECORAMP V1.0 se puede ver claramente cual es el píxel de retardo que se está seleccionando. En la figura 6.1 se puede ver este píxel (circulo rojo inferior indica el píxel correspondiente al comienzo de la selección). La aplicación ECORAMP V1.0 permite ver el valor de cada uno de los puntos en la barra de estado, además de la amplitud para cada punto, y con la ventana **zoom** se facilita el proceso de selección. Si se tiene la ventana **raster** abierta, las selecciones hechas en cada traza de la ventana **amplitud** quedarán marcadas en la imagen raster y viceversa, la selección hecha en la imagen raster quedará marcada en la traza correspondiente en la ventana amplitud.

Se han validado otros archivos mediante procesamientos de datos de radar hechos en los glaciares del volcán Mocho-Choshuenco (Fig. 6.2) y del volcán Villarrica, con resultados similares a los obtenidos con el proceso antiguo. En la Figura 6.3 se puede ver el resultado final de un perfil (j20-17.dz2) hecho en el glaciar del volcán Mocho en septiembre del año 2004 y procesado con la aplicación EcoRamp V1.0.



Fig 6.2: Volcán Mocho-Choshuenco.

Algunos de estos resultados obtenidos al procesar los datos de radar con la aplicación ECORAMP V1.0 han participado en posters presentados en conferencias,

como por ejemplo: Mass balance and ice volume measurements at Volcán Mocho-Choshuenco, Chile [Cas2004] y Glaciology of Volcán Villarrica [Riv2004].

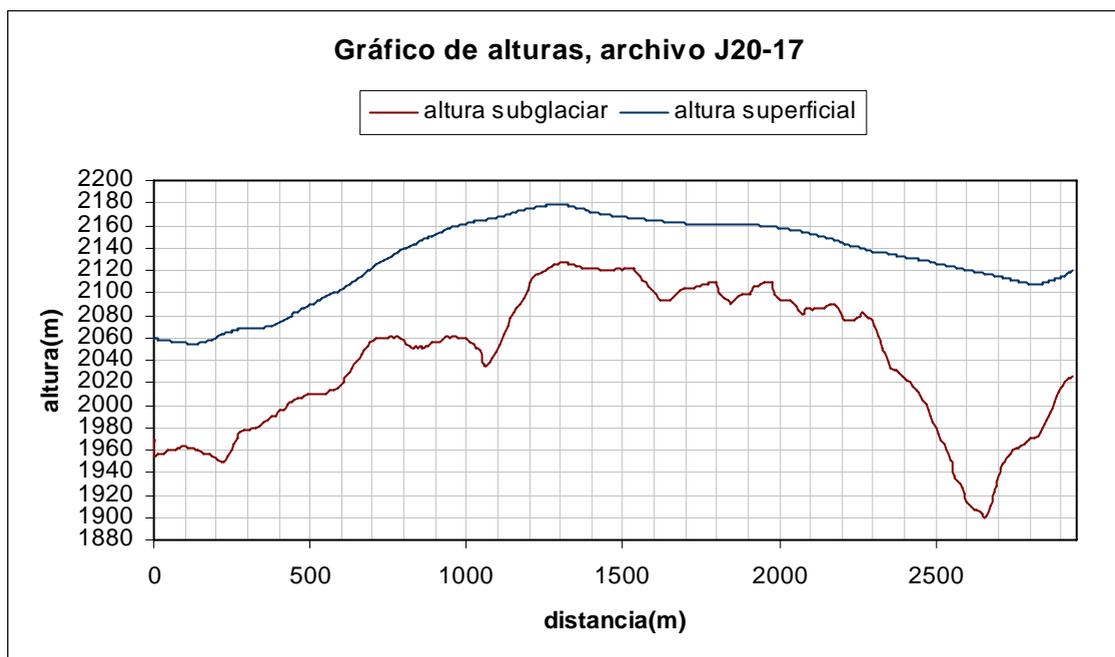


Fig 6.3: Resultado final del procesamiento del perfil (j20-17.dz2) hecho en el glaciar del volcán Mocho en septiembre del año 2004 y procesado con la aplicación ECORAMP V1.0.

6.3 Conclusiones generales

El método de radio eco sondaje es una poderosa herramienta para la obtención de resultados de espesor de hielo y estratigrafía interna. Gracias a su portabilidad y bajo costo permite realizar mediciones en lugares de acceso muy complicado. Esta razón exige que los datos puedan ser validados al momento en que se están adquiriendo, por lo tanto un sistema que nos permita hacer esto resulta muy ventajoso.

El estudio de GPS y su funcionamiento, permitió la incorporación de datos GPS, al sistema de procesamiento, mediante la interpolación, entregando información georeferenciada que agiliza el proceso de obtención de resultados.

El procesamiento de imágenes mediante la modificación de contraste ayudó en el análisis de imágenes raster que presentaban poca claridad en la topografía subglaciar, además de suplir en cierta medida la pérdida de información producto del ajuste de los datos en 16 bits a 8 bits para la representación en escala de grises.

El algoritmo de detección automática de la topografía subglaciar entregó resultados limitados, por lo que el sistema manual continúa siendo la mejor opción.

Los datos procesados y visualizados con el sistema antiguo sólo ocupaban 8 bits, a pesar de ser adquiridos en 16 bits, ya que las herramientas utilizadas truncaban el byte menos significativo en los procesos de transformación y visualización.

Dentro de los objetivos de esta tesis se fijó la definición de los formatos de adquisición y se vio que en el formato de 8 bits se pierde información con respecto al formato de 16 bits. La información que se pierde va a depender mucho del tipo de señal que estemos recibiendo. Si la señal es muy suave no se alcanzan a percibir en 8 bits las variaciones que se tiene en 16 bits. Asimismo, si el pulso de retorno está cercano al nivel de ruido probablemente se pierda la señal antes en 8 bits, por lo que en este caso resulta mejor utilizar 16 bits para la adquisición de datos.

Con respecto al sistema de adquisición resulta muy conveniente poder ver en la pantalla del computador información referente a los datos que se están recibiendo, ya sea en formato amplitud o en formato raster. La modificación del código del antiguo programa y la implementación de la nueva aplicación de adquisición entregan información que facilita el trabajo de los glaciólogos, ayudándolos a economizar tiempo, energía y recursos en el desarrollo de las campañas.

La implementación de la aplicación ECORAMP V1.0 permitió realizar el proceso de obtención de datos de espesor georeferenciados de manera rápida y cómoda, con gran precisión, ya que se disminuyó considerablemente la cantidad de pasos que se debía hacer. Los procesos realizados con diversas aplicaciones se han integrado en una sola aplicación específica para los datos de radar obtenidos con el radar LGCC-CECS.

Finalmente los resultados han sido validados comparándolos con mediciones y análisis realizados con el proceso antiguo en distintos glaciares, entregando buenos datos en todos los casos. Algunos de los datos obtenidos con EcoRamp han sido enviados a conferencias y publicaciones.

6.4 Desarrollos futuros

Como desarrollo futuro se propone la implementación de algoritmos más robustos que permitan el reconocimiento de la topografía de manera automática. Estos algoritmos pueden ser basados en las imágenes o también en las señales o en la complementación de estos dos tipos.

Se propone asimismo la implementación de algoritmos más poderosos de procesamiento de imágenes para obtener una mejor percepción de la topografía subglaciar, de la estratigrafía interna y obtener una mayor precisión en la obtención de los espesores.

Finalmente la obtención de los datos GPS junto con los datos de radar resultaría muy útil ya que se evitaría realizar procesamientos posteriores, disminuyendo los tiempos de procesamiento e introduciendo mayor precisión ya que se trabajaría con un mismo sistema horario, sin dar lugar a posibles desfases en el tiempo.

Referencias

- [Bog1985] Bogorodsky, V.V. Bentley, C.R. y Gudmandsen, P.E. 1985. Radioglaciology, D. Reidel Publishing Company. 254 pp.
- [Car2002] Cardama A. 2002, Antenas.
- [Car1998] Cárdenas C. 1998, Evaluación de transmisores de radar para hielo: aplicación en Patriot Hills, Antártica.
- [Cas2004] Casassa, G., F. Bown, C. Acuña & A. Rivera. Mass balance and ice volume measurements at Volcán Mocho-Choshuenco, Chile. En: IAVCEI General Assembly, Pucón, Chile, 14-19 Noviembre 2004.
- [EM2003] Enginner Manual (1 July 2003), NAVSTAR Global Positioning System Surveying, Engineering and design.
- [Geo2004] Geophysical Survey Systems, Inc
<http://www.geophysical.com>
- [HFE1996]: HUSKY FS3 especification
<http://www.huskynordic.com/products/fs3spec.html>
- [IDS2002] IDS Ingenieria dei Sistemi S.P.A
<http://www.ids-spa.it/>
- [Img2000]: Image Processing Learning Resources
http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/hipr_top.htm
- [IPCC2001] IPCC Third Assessment Report 2001, Climate Change.
- [Jäh2002] DR. Jähne B. 2002, Digital Image Processing 5th revised and extended edition, Springer, Capitulo 10.
- [Jel1997] Jelincic B. (1997), Desarrollo de un sistema digital de radar para hielo.
- [MGE2003] Mala Geoscience
<http://www.malags.se/>
- [PGE2003] Parallel Geoscience
<http://www.parallelgeo.com>
- [Riv2001] Rivera A., Casassa G., Acuña C. 2001. Mediciones de espesor en glaciares de Chile centro-sur. Revista Invetigaciones Geográficas, 35:67-100.
- [Riv2004] Rivera, A., F. Bown, C. Acuña & G. Casassa . Glaciology of Volcán Villarrica. En: IAVCEI General Assembly, Pucón, Chile, 14-19 Noviembre 2004.

- [See1993] Seeber G. 1993, Satellite Geodesy Foundations, Methods, and Applications, Walter de Gruyter.
- [SSI2003] Sensors & Software Inc.
<http://www.sensoft.on.ca/>
- [Tek2003] Tektronix (2003) THS710A, THS720A, THS730A & THS720P, TekScope™ Programmer Manual.
- [WyW1981] Watts, R.D. y Wright, D.L.(1981), System for measuring thickness of temperature and polar ice from the ground of from the air, Journal of Glaciology, Vol 27, N° 97, 459-469.

ANEXO I. Comandos utilizados para el control del osciloscopio

Tektronix THS730A

El osciloscopio Tektronix puede ser controlado a través de la interfaz RS-232 usando un grupo de comandos y consultas. En este anexo se utiliza una notación y sintaxis para describir los diferentes comandos y consulta. Los símbolos utilizados se listan a continuación:

Símbolo	Significado
< >	Define un elemento
	OR exclusivo
{ }	Grupo; un elemento es requerido

Tabla I.1: Símbolos utilizados en la descripción de comandos.

Los comandos modifican la configuración del instrumento o le dicen al instrumento que debe hacer. Las consultas hacen que el instrumento retorne datos e información referente a su estado. La mayoría de los comandos tiene ambas configuraciones, configurar y consultar, y la forma del comando es la misma excepto que en el formato de consulta se debe poner un símbolo de interrogación al final.

Los comandos y las consultas se pueden escribir de manera abreviada. Esta abreviación corresponde a las letras mayúsculas en la lista de comandos, por ejemplo, el comando ACQUIRE:MODE puede ser introducido como ACQ:MOD o acq:mod.

A continuación se presentará una lista de comandos utilizados para controlar el osciloscopio [Tek2003] para la adquisición de los datos de radar. Esta lista está compuesta por el nombre del comando, el significado y la sintaxis.

Comando	Significado
<p>ACQuire:MODE</p>	<p>Fija o consulta el modo de adquisición del osciloscopio. Esto afecta toda la existencia de la curva. Este comando es equivalente a configurar Acquire Mode en el menú Acquire. El modo de adquisición configurado con este comando determina como es generado el valor final del intervalo de adquisición desde el conjunto de muestra de los datos.</p> <p>Sintaxis</p> <hr/> <p>ACQuire:MODE { SAMmple PEAKdetect AVErage ENVelope }</p> <p>ACQuire:MODE?</p> <p>Donde:</p> <p>SAMple especifica que el valor del punto desplegado es simplemente el valor de la primera muestra durante el intervalo de adquisición.</p> <p>PEAKdetect especifica el despliegue de los valores altos y bajos de las muestras tomadas de una única adquisición.</p> <p>AVERage resulta en una forma de onda que muestra un promedio de puntos de varias adquisiciones de curvas separadas. El número de curvas a promediar se fija mediante ACQuire:NUMAVg.</p> <p>ENVelope resulta en una forma de onda que muestra el rango PEAKdetect de puntos de muchas adquisiciones separadas.</p>
<p>ACQuire:NUMAVg</p>	<p>Fija el número de curvas del osciloscopio que serán promediadas.</p> <p>Sintaxis</p> <hr/> <p>ACQuire:NUMAVg <NR1></p> <p>ACQuire:NUMAVg?</p> <p>Donde:</p> <p><NR1> Puede ir de 2 a 256</p>

Comando	Significado
<p>ACquire:STATE</p>	<p>Inicia o detiene la adquisición del osciloscopio. Este comando es equivalente a presionar el botón HOLD del panel frontal.</p> <p>Sintaxis</p> <hr/> <p>ACquire:STATE { OFF ON RUN STOP <NR1> }</p> <p>ACquire:STATE?</p> <p>Donde:</p> <p>ON o RUN o <NR1> ≠ 0 inician la adquisición y despliegue de la curva. Si el comando fuese utilizado en la mitad de una secuencia de adquisición, RUN reinicia la secuencia descartando cualquier dato acumulado antes de STOP.</p>
<p>ACquire:STOPAfter</p>	<p>Le dice al osciloscopio cuando debe parar de adquirir curvas.</p> <p>Sintaxis</p> <hr/> <p>ACquire:STOPAfter { RUNSTop SEquence }</p> <p>ACquire:STOPAfter?</p> <p>Donde:</p> <p>RUNSTop especifica que los estados run y stop serían determinados por el usuario presionando el botón HOLD del panel frontal.</p> <p>SEquence especifica una única secuencia de operación, donde el instrumento parará después de haber adquirido las curvas suficientes para satisfacer el modo de adquisición.</p>
<p>CH<x>?</p>	<p>Retorna los parámetros verticales del osciloscopio.</p> <p>Sintaxis</p> <hr/> <p>CH<x>?</p> <p>Donde:</p> <p><x> Puede ser 1 o 2.</p>

Comando	Significado
<p>CH<x>:BANdwidth</p>	<p>Fija o consulta la configuración del ancho de banda del canal especificado en <x> del osciloscopio.</p> <p>Sintaxis</p> <hr/> <p>CH<x>:BANdwidth { TWEnty FULL}</p> <p>CH<x>:BANdwidth?</p> <p>Donde: TWEnty configura el ancho de banda del canal A 20 MHz</p>
<p>CH<x>:COUPling</p>	<p>Fija o consulta la configuración del atenuador de acoplamiento de entrada del canal <x> del osciloscopio. Este comando es equivalente a configurar el acoplamiento en el menú Vertical.</p> <p>Sintaxis</p> <hr/> <p>CH<x>:COUPling { AC DC GND}</p> <p>CH<x>:COUPling?</p>
<p>CH<x>:POSition</p>	<p>Fija o consulta la posición vertical del canal <x> del osciloscopio especificado, el valor de la posición del voltaje es aplicado a la señal antes de la digitalización.</p> <p>Sintaxis</p> <hr/> <p>CH<x>:POSition <NR1></p> <p>CH<x>:POSition?</p> <p>Donde <NR1> es la posición deseada, en divisiones desde el centro de la cuadrícula, el rango es ± 5.</p>
<p>CH<x>:PROBe:UNITs</p>	<p>Fija o consulta el tipo de voltaje o corriente que es adjuntado al canal <x> .</p> <p>Sintaxis</p> <hr/> <p>CH<x>:PROBe:UNITs { VOLts AMPS }</p> <p>CH<x>:PROBe:UNITs?</p>

Comando	Significado
<p>CH<x>:SCALE</p>	<p>Fija o consulta la ganancia vertical del canal <x> del osciloscopio.</p> <p>Sintaxis</p> <hr/> <p>CH<x>:SCALE <NR1></p> <p>Donde: <NR1> es la ganancia en volts por división.</p>
<p>DATA:ENCdg</p>	<p>Fija o consulta el formato de los datos de la curva.</p> <p>Sintaxis</p> <hr/> <p>DATA:ENCdg {ASCIi RIBinary RPBinary SRIBinary}</p> <p>DATA:ENCdg?</p> <p>Donde:</p> <p>ASCIi especifica que los datos se envían en formato texto entero con signo.</p> <p>RIBinary especifica una representación por punto entero con signo y con transferencia de byte más significativo primero.</p> <p>RPBinary especifica una representación por punto entero positivo y con transferencia de byte más significativo primero.</p> <p>SRIBinary es lo mismo que RIBinary, pero aquí se envía el byte menos significativo primero.</p> <p>SRPbinary es lo mismo que RPBinary pero aquí se envía el byte menos significativo primero.</p>

Comando	Significado
<p>DATA:SOURce</p>	<p>Fija o consulta la ubicación de los datos de la forma de onda que es transferida desde el osciloscopio con CURVe? .</p> <p>Sintaxis</p> <hr/> <p>DATA:SOURce <wfm></p> <p>DATA:SOURce?</p> <p>Donde:</p> <p style="padding-left: 40px;"><wfm> es la fuente de datos de la forma de onda que será transferida desde el osciloscopio.</p>
<p>DATA:START</p>	<p>Fija o consulta el punto de partida para la curva del osciloscopio. Este comando permite la transferencia parcial de una curva.</p> <p>Sintaxis</p> <hr/> <p>DATA:START <NR1></p> <p>DATA:Stara?</p> <p>Donde:</p> <p style="padding-left: 40px;"><NR1> Puede tomar valor entre 1 y 2500. Este valor será el primer punto de la curva transferido.</p>
<p>DATA:STOP</p>	<p>Fija o consulta el ultimo punto de la curva del osciloscopio que será transferida usando el comando CURVe? .</p> <p>Sintaxis</p> <hr/> <p>DATA:STOP <NR1></p> <p>DATA:STOP?</p> <p>Donde:</p> <p style="padding-left: 40px;"><NR1> Valor en el rango de 1 a 2500 para la curva del osciloscopio, este es el último punto que será transferido. Los datos serán transferidos desde DATA:START hasta DATA:STOP.</p>

Comando	Significado
<p>DATA:WIDTH</p>	<p>Fija el número de bytes por cada punto de la curva del osciloscopio que será transferida con CURVe?</p> <p>Sintaxis</p> <hr/> <p>DATA:WIDTH <NR1></p> <p>Donde:</p> <p><NR1> = 1 especifica que hay 1 byte (8 bits) por punto.</p> <p><NR2> = 2 especifica que hay 2 bytes (16 bits) por punto. Se recomienda para el cálculo promediado de la curva.</p>
<p>HEADer</p>	<p>Configura o consulta el Response Header Enable State, que causa que el osciloscopio incluya u omita los encabezados en las respuestas a las consultas.</p> <p>Sintaxis</p> <hr/> <p>HEADer { <NR1> OFF ON }</p> <p>HEADer?</p> <p>Donde:</p> <p><NR1>: Puede ser 0 para el header deshabilitado y distinto de para header habilitado.</p> <p>OFF: El osciloscopio omite el header.</p> <p>ON : El osciloscopio incluye el header.</p>
<p>HORizontal:POSition</p>	<p>Posiciona horizontalmente la curva del osciloscopio en la pantalla, este comando es equivalente a ajustar en el panel frontal la posición horizontal.</p> <p>Sintaxis</p> <hr/> <p>HORizontal:POSition <NR1></p> <p>HORizontal:POSition?</p> <p>Donde:</p> <p><NR1> puede ser de 0 a 99.96 y es el porcentaje de curva que es desplegado a la izquierda de la cuadrícula central.</p>

Comando	Significado
<p>HORizontal:TRIGger:POSition</p>	<p>Fija o consulta la posición del trigger del osciloscopio, esto es equivalente a configurar Trigger Position en el menú horizontal.</p> <p>Sintaxis</p> <hr/> <p>HORizontal:TRIGger:POSition <NR1></p> <p>HORizontal:TRIGger:POSition</p> <p>Donde: <NR1> puede tomar valores de 0 a 100%</p>
<p>LOCK</p>	<p>Habilita o deshabilita todos los botones del panel frontal del osciloscopio.</p> <p>Sintaxis</p> <hr/> <p>LOCK { ALL NONE }</p> <p>Donde: ALL habilita. NONE deshabilita.</p>
<p>TRIGger:MAIn:EDGE:COUpling</p>	<p>Fija o consulta el tipo de acoplamiento para el osciloscopio con el trigger de la curva principal.</p> <p>Sintaxis</p> <hr/> <p>TRIGger:MAIn:EDGE:COUpling { DC HFRej LFRej NOISErej }</p> <p>TRIGger:MAIn:EDGE:COUpling?</p>
<p>UNLock</p>	<p>Comando equivalente a LOCK NONE.</p> <p>Sintaxis</p> <hr/> <p>UNLock ALL</p>

Comando	Significado
WFMPre?	<p>Retorna el formato de los datos de la forma de onda para la curva o curvas especificadas con DATA:SOURCE.</p> <p>Sintaxis</p> <hr/> <p>WFMPre?</p>
WFMPre:PT_Fmt	<p>Selecciona el formato del punto de la curva, para el primer pedido de curva, que es especificado por DATA:SOURCE.</p> <p>Sintaxis</p> <hr/> <p>WFMPre:PT_Fmt Y</p> <p>Donde: Y especifica una curva normal donde un punto ASCII o binario es transmitido por cada punto en el registro de la curva, sólo los valores de Y son transmitidos explícitamente</p>
*OPC?	<p>El comando *OPC permite la sincronización de operaciones entre el instrumento y la aplicación de control.</p> <p>Sintaxis</p> <hr/> <p>*OPC?</p>

ANEXO II: Algoritmos implementados

En este anexo se muestran y explican algunos de los algoritmos implementados. No se presenta todo el código para reducir espacio, porque son aproximadamente 2000 líneas de código.

Abrir y almacenar datos.

```
//Variable global que direcciona el archivo que contiene los datos de radar
TFileStream *fs1
//Abrir archivo en formato lectura
fs1 = new TFileStream(OpenDialog1->FileName.c_str(),fmOpenRead);
//Se guarda el nombre del archivo
nombre_archivo = OpenDialog1->FileName.c_str();
//Se guarda el tamaño del archivo
tam = fs1->Size;
/***** DZ2 o DZT *****/
/**/ if(OpenDialog1->FilterIndex==1) /**/
/**/ { /**/
/**/     incremento=2; /**/
/**/     curvas = (tam/1024)-1; /**/
/**/     bytes = 1024; /**/
/**/ } /**/
/**/ else /**/
/**/ { /**/
/**/     incremento=1; /**/
/**/     curvas = (tam/512)-1; /**/
/**/     bytes = 512; /**/
/**/ } /**/
/***** fin creacion arreglo *****/
/**/ -----fin creacion arreglo-----/**/
/*****
/*****
//ingreso de datos al arreglo
for (i=bytes;i<tam;i=i+incremento)//desde la primera curva hasta el final de fs1
{
    fs1->Position = i; //Ubico la posicion
    fs1->Read(buf,2); //Leo los bytes
    CGaugel->Progress = i; //aumento la barra de progrso para indicar posicion
    if (j_==511) //si se llega al ultimo byte de la fila se pasa a la siguiente
    {
        j_=0;
        i_++;
    }
    else
    {
        if (incremento==2) //si el archive es DZ2
        {
            valor = (int)buf[0]*256 + (int)buf[1];
            datos[j_][i_] = valor; //guardo el valor de 16 bits
        }
        else //si el archivo es DZT
        {
            valor =(int)buf[0];
            datos[j_][i_] = valor; //guardo el valor de 8 bits
        }
        j_++;
    }
}
}
```

Despliegue de datos en formato amplitud

```

/*****
// Si es DZ2 el valor del dato lo multiplicamos por un factor menor a //
// cero (1/(65535/470)) ≈ 0.00717 y lo ajustamos al tamaño del area de //
// dibujo (470) //
// Si es DZT el factor será mayor a cero (470.0/255.0) ≈ 1.8 //
*****/
if (incremento == 2) //si se abre un DZ2
{
    //nos ponemos al comienzo de la curva
    FormAmplitud->PaintBox1->Canvas->MoveTo(0,
        470-(0.00717173875*(datos[12][curva]));
    factor = (1/(65535.0/470.0)); //calculamos el factor
    for (i=0;i<500;i++) //para dibujar los 500 puntos
    {
        //Asignamos el color de la curva
        FormAmplitud->PaintBox1->Canvas->Pen->Color = clYellow;
        FormAmplitud->PaintBox1->Canvas->Pen->Style = psSolid;
        if (Amplitudabsolutol->Checked==true) //Si se elige amplitud absoluto
        {
            if((datos[i+12][curva])<=32768)
            {
                FormAmplitud->PaintBox1->Canvas->LineTo((1.5*i),
                    (factor*datos[i+12][curva]));
            }
            else FormAmplitud->PaintBox1->Canvas->LineTo((1.5*i),
                470-( factor *(datos[i+12][curva])));
        }
        //Si no se elige amplitud absoluto
        else FormAmplitud->PaintBox1->Canvas->LineTo((1.5*i),
            470-( factor *(datos[i+12][curva])));
    }
}
else if (incremento == 1) //si abre un DZT
{
    FormAmplitud->PaintBox1->Canvas->MoveTo(0,1.843*(255-datos[12][curva]));
    factor = (470.0/255.0); //calculamos el factor
    for (i=0;i<500;i++)
    {
        FormAmplitud->PaintBox1->Canvas->Pen->Color = clYellow;
        FormAmplitud->PaintBox1->Canvas->Pen->Style = psSolid;
        if (Amplitudabsolutol->Checked==true) //Si se elige amplitud absoluto
        {
            if(datos[i+12][curva]>128)
            {
                FormAmplitud->PaintBox1->Canvas->LineTo((1.5*i),
                    factor *(255-datos[i+12][curva]));
            }
            else FormAmplitud->PaintBox1->Canvas->LineTo((1.5*i),
                factor *(datos[i+12][curva]));
        }
        //Si no se elige amplitud absoluto
        else FormAmplitud->PaintBox1->Canvas->LineTo((1.5*i),
            factor *(255-datos[i+12][curva]));
    }
}
}

```

Despliegue de datos en formato raster

```
//Se asignan las dimensiones de la imagen raster
FullViewForm->Imagel->Width = curvas;
FullViewForm->Imagel->Height = 500;

/***** DIBUJO RASTER EN BLANCO Y NEGRO *****/
if (incremento==2) divisor = 256; //si es DZ2 color lo divide por 256 (16 bits)
else divisor = 1; // si no solo toma el valor que viene (8 bits)
//desde la primera a la ultima curva
for(i=0;i<curvas;i++)
{
    FullViewForm->Imagel->Canvas->MoveTo(i,j);
    CGaugel->Progress = i;//para mostrar la barra de progreso
    //desde el primer punto de la curva (i) hasta el ultimo punto de la curva (i)
    for (j=0;j<500;j++)
    {
        //color es igual a valor de la amplitud ajustado al escala de grises
        color = datos[j+12][i]/divisor;
        //se asigna el color
        FullViewForm->Imagel->Canvas->Pen->Color = RGB(color,color,color);
        //Se pinta el pixel con el valor recién asignado
        FullViewForm->Imagel->Canvas->LineTo(i,j);
    }
}

/***** DIBUJO RASTER EN COLOR CENTRADO EN VERDE *****/
//Para cada intervalo se elige el color
for(i=0;i<curvas;i++)
{
    FullViewForm->Imagel->Canvas->MoveTo(i,j);
    CGaugel->Progress = i;
    for (j=0;j<500;j++)
    {
        valor = datos[j+12][i];
        if (valor <= 10922)
        {
            // desde 0x7F0000 hasta 0xFF0000
            color = (127 + (valor/85))*65536;
            FullViewForm->Imagel->Canvas->Pen->Color = color;
            FullViewForm->Imagel->Canvas->LineTo(i,j);
        }
        else if ((valor > 10922) && (valor <=21844))
        {
            //desde 0xFF0000 hasta 0xFFFF00
            color = 16711680 +(((valor-10922)/43)+1)*256;
            FullViewForm->Imagel->Canvas->Pen->Color = color;
            FullViewForm->Imagel->Canvas->LineTo(i,j);
        }
        else if((valor >21844)&&(valor <=32766))
        {
            //desde 0xFFFF00 hasta 0x00FF00
            color = ((255-(((valor-21844)/43)+1))*65536)+65280;
            FullViewForm->Imagel->Canvas->Pen->Color = color;
            FullViewForm->Imagel->Canvas->LineTo(i,j);
        }
        else if((valor >32766)&&(valor <=43688))
        {
            //desde 0x00FF00 hasta 0x00FFFF
            color = 65280 + (((valor-32766)/43)+1);
            FullViewForm->Imagel->Canvas->Pen->Color = color;
            FullViewForm->Imagel->Canvas->LineTo(i,j);
        }
        else if((valor >43688)&&(valor <=54610))
        {
            //desde 0x00FFFF hasta 0x0000FF
            color = ((255-(((valor-43688)/43)+1))*255)+255;
            FullViewForm->Imagel->Canvas->Pen->Color = color;
            FullViewForm->Imagel->Canvas->LineTo(i,j);
        }
        else {
            //desde 0x0000FF hasta 0x00007F
            color = (255-(((valor-54610)/85)+1));
            FullViewForm->Imagel->Canvas->Pen->Color = color;
            FullViewForm->Imagel->Canvas->LineTo(i,j);
        }
    }
}
}
```

Contraste y suavizado

```
/******          ALGORITMO DE CONTRASTE          *****/
cur = RasterForm->curvas; //numero de curvas
c = TrackBar2->Position; //valor de c
d = TrackBar3->Position; // valor de d
valor = (TrackBar1->Position*0.025); //valor gamma
RasterForm->CGauge1->MaxValue = cur; //para definir el tamaño de barra de progreso
RasterForm->CGauge1->Visible = true; // se hace visible la barra de progreso
factor = (pow(255,valor)); // valor ^255
if(c==d)c=c+1; //si son iguales se produce division por cero
factor_ = 255.0/(d-c); // la otra parte de la ecuacion de contrast stretching
i=0;j=0; //inicializacion de contadores
if (RasterForm->incremento==2) divisor = 256; //trasformacion DZ2 a escala de grises
else divisor = 1; // DZT conserva los mismos valores
for(i=0;i<cur;i++) // Recorremos las curvas
{
    FullViewForm->Image2->Canvas->MoveTo(i,j); //nos movemos al inicio de cada curva
    RasterForm->CGauge1->Progress = i; // para mostrar el progreso del proceso
    for(j=0;j<500;j++) // recorremos cada punto de la curva (i)
    {
        color = RasterForm->datos[j+12][i]/divisor; // observamos el valor original
        color = (color - c)*factor_; // aplicamos contrast stretching
        if (color<=0)// valores menores a cero se dejan como cero
        {
            FullViewForm->Image2->Canvas->Pen->Color = RGB(0,0,0);
        }
        else
        if (color>=255) // valores mayores a 255 se dejan como 255
        {
            FullViewForm->Image2->Canvas->Pen->Color = RGB(255,255,255);
        }
        else
        {
            //aplicamos desplazamiento de contraste sobre contrast stretching
            color = (255/factor)*pow(color,valor);
            //asignamos el color
            FullViewForm->Image2->Canvas->Pen->Color = RGB(color,color,color);
        }
        //pintamos
        FullViewForm->Image2->Canvas->LineTo(i,j);
    }
}

/******          ALGORITMO DE SUAVIZADO          *****/
//se aplica sobre una matriz de 3x3
for (k=1;k<X_final-2;k++)
{
    RasterForm->CGauge1->Progress = k;
    for (j=0;j<500;j++)//mantener en forma temporal los valores los 3 valores por fila
    {
        temporal[0][j]= FullViewForm->Image2->Canvas->Pixels[k-1][j];
        temporal[1][j]= FullViewForm->Image2->Canvas->Pixels[k][j];
        temporal[2][j]= FullViewForm->Image2->Canvas->Pixels[k+1][j];
    }
    for (j=0;j<488;j++) //para todos los puntos de cada curva
    {
        // se llenan los valores de la matriz de 3x3
        valores[0]= temporal[0][j];
        valores[1]= temporal[1][j];
        valores[2]= temporal[2][j];
        valores[3]= temporal[0][j+1];
        valores[4]= temporal[1][j+1];
        valores[5]= temporal[2][j+1];
        valores[6]= temporal[0][j+2];
        valores[7]= temporal[1][j+2];
        valores[8]= temporal[2][j+2];
        // se ordenan los valores mediante la función quicksort implementada
        quicksort(valores,9);
        color = valores[5]; // se elige la mediana
        //se pinta del color correspondiente
        FullViewForm->Image2->Canvas->Pixels[k][j+1]= RGB(color,color,color);
    }
}
}
```

Cálculo automático del fondo

```
//para hacer visible la barra de progreso
RasterForm->CGauge1->Visible = true;
//para definir el tamaño de la barra de progreso (100%)
RasterForm->CGauge1->MaxValue = X_final;
//proceso iterativo que parte en el X donde se selecciona el vector inicial
//y termina en el X final marcado por el usuario, si no marca el X final es igual
//al numero total de curvas
for (k=X;k<X_final;k++)
{
    //en el peor caso todos los píxeles del vector tienen valor 255, esto es,
    //comparar un vector blanco con uno negro
    mejor_valor=7651;
    //para marcar el progreso en la barra de progreso
    RasterForm->CGauge1->Progress = k;
    //Para recorrer el vector en sentido vertical según los valores marcados por
    //el usuario
    for (j=desde;j<hasta;j++)
    {
        //variable que contendrá el valor de la suma de las diferencias
        temp = 0;
        //para tomar el vector que se va a comparar
        for(i=0;i<30;i++)
        {
            temporal[i]=GetRValue(FullViewForm->Image2->Canvas->Pixels[k][j+i]);
        }
        //Se hace la comparación valor a valor
        for(i=0;i<30;i++) {
            temp+=abs(temporal[i]-RasterForm->vector_bedrock[i]);
        }
        //Se ve si es menor la diferencia, lo que implica que es vector se parece
        //mas al original
        if(temp<mejor_valor)
        {
            marcador = j;
            for(i=0;i<30;i++)
            {
                //Se va guardando el mejor vector temporalmente
                mejor_arreglo[i]= temporal[i];
            }
            mejor_valor=temp;
        }
    }
    for (i=0;i<30;i++)
    {
        //Se reemplaza el mejor vector original por el nuevo mejor vector
        //encontrado para repetir el proceso
        RasterForm->vector_bedrock[i] = mejor_arreglo[i];
    }
    //Se pinta el pixel correspondiente al fondo encontrado
    FullViewForm->ImageDibujo->Canvas->Pixels[k][marcador+15] = c1Red;
}
```

Cálculo de espesor a partir de los perfiles dibujados

```
//Los datos serán desplegados en una grilla llamada StringGrid1
//se asigna la cantidad de filas de la grilla
ConeccionForm->StringGrid1->RowCount = curvas+1;
//*****
//Se escribe el encabezado de la grilla
ConeccionForm->StringGrid1->Cells[0][0]=" ID";
ConeccionForm->StringGrid1->Cells[1][0]=" Pixel sup.";
ConeccionForm->StringGrid1->Cells[2][0]=" Pixel inf.";
ConeccionForm->StringGrid1->Cells[3][0]=" Espesor m.";
ConeccionForm->StringGrid1->Cells[4][0]=" Hora";
//para limpiar los combobox del formulario de interpolación, donde mas tarde se
//se desplegaran datos relacionados con GPS
ConeccionForm->ComboBoxFecha->Clear();
ConeccionForm->ComboBoxHora->Clear();
ConeccionForm->ComboBoxX->Clear();
ConeccionForm->ComboBoxY->Clear();
ConeccionForm->ComboBoxZ->Clear();
// para agregar los valores de los píxeles superior e inferior
for (x=0;x<curvas+1;x++)
{
    //Variable que indica en que columna se agregan los datos
    count = 1;
    ConeccionForm->StringGrid1->Cells[0][x+1]=x; // en la columna cero va el id
    //Se recorre toda la curva buscando los píxeles superior e inferior
    for (y=0;y<500;y++)
    {
        //Si encuentra un pixel de color rojo y el pixel anterior no es rojo y count
        //es menor que 3 (esto es para que reconosca las 2 primeras curvas)
        if((FullViewForm->ImageDibujo->Canvas->Pixels[x][y]==clRed)&&(count<3)&&
            (FullViewForm->ImageDibujo->Canvas->Pixels[x][y-1]!=clRed))
        {
            //Si encuentra la segunda curva
            if (count==2)
            {
                //Agrega el valor del píxel + el valor de desplazamiento, en el
                //caso que éste exista
                ConeccionForm->StringGrid1->Cells[count][x+1]=y+Edit1->Text.ToInt();
                count++;
            }
            //Si es la primera curva
            else
            {
                //Agrega el valor del píxel de la primera curva
                ConeccionForm->StringGrid1->Cells[count][x+1]=y;
                count++;
            }
        }
    }
}
for (x=0;x<curvas+1;x++) // para agregar los espesores a la columna 4 (3)
{
    //Si existe un pixel inferior
    if(ConeccionForm->StringGrid1->Cells[2][x+1]!="")
    {
        valor2 =ConeccionForm->StringGrid1->Cells[2][x+1].ToInt()+1;
        valor1 =ConeccionForm->StringGrid1->Cells[1][x+1].ToInt();
        //se calcula t según los valores de los píxeles
        t = (abs(valor2-valor1)*RasterForm->Labell->Caption.ToDouble())/50*2000000;
        //Se calcula es espesor con la función espesor y el resultado se escribe en
        //la cuarta columna
        ConeccionForm->StringGrid1->Cells[3][x+1]=Espesor(t);
    }
}
//Se carga el archive *.LOG correspondiente
if(ConeccionForm->OpenDialog1->Execute())
{
    list->LoadFromFile(ConeccionForm->OpenDialog1->FileName);
}
//Se agregan las horas
for (x=1;x<curvas+1;x++)
{
    Agregar_hora(ConeccionForm->StringGrid1->Cells[4][x], list->Strings[x].SubString)
}
```

Interpolación datos de radar con datos GPS

```
y_i=1; //inicializo variable
i_i=1; //inicializo variable
c_h=ComboBoxHora->ItemIndex; //*****
c_f=ComboBoxFecha->ItemIndex; /**
c_x=ComboBoxX->ItemIndex; /** Captura de valores **
c_y=ComboBoxY->ItemIndex; /** según selección del usuario**
c_z=ComboBoxZ->ItemIndex; //*****
//Encabezado del archivo de salida
fila = "ID radar, Fecha, Hora GPS, Hora Radar, Espesor, "+
        StringGrid2->Cells[c_x][0]+", "+
        StringGrid2->Cells[c_y][0]+", "+
        StringGrid2->Cells[c_z][0]+", Down(m)";
list->Add(fila); //Se agrega el encabezado
//mientras en los datos de radar no exista espesor y hora
while((StringGrid1->Cells[3][i_i]=="")&&(StringGrid1->Cells[4][i_i!=""]))
{
    i_i++; //busca hasta encontrar la primera hora con espesor
    //Se asigna esta hora a la variable horaRadar
    horaRadar = StrToTime(StringGrid1->Cells[4][i_i]);
}
//Se asigna a horaRadar la primera hora encontrada con espesor
horaRadar = StrToTime(StringGrid1->Cells[4][i_i]);
//Se asigna a la variable horaGPS1 la primera hora contenida en el archivo GPS
horaGps1 = StrToTime(StringGrid2->Cells[c_h][y_i]);
//Se revisan todas las horas contenidas en el archivo de radar
while (i_i<RasterForm->curvas)
{
    //para encontrar la primera hora con espesor en el caso que hay saltos en los datos
    while((StringGrid1->Cells[3][i_i]=="")&&(i_i<RasterForm->curvas)) i_i++;
    while (horaRadar>horaGps1) //para encontrar la primera hora en el listado GPS
    {
        y_i++;
        if(y_i>0);
        horaGps1 = StrToTime(StringGrid2->Cells[c_h][y_i]);
    }
    //Si la hora de radar coincide con la hora GPS de agregan los datos sin interpolar
    if((horaRadar==horaGps1)&&(StringGrid1->Cells[3][i_i!=""]))
    {
        //Se calcula el valor de altura para la topografía subglaciar (Altura-espesor)
        down = FloatToStr(StrToFloat(StringGrid2->Cells[c_z][y_i])-
                           StrToFloat(StringGrid1->Cells[3][i_i]));

        //**** agregar los datos a cada fila
        //id r, fecha, hora gps, hora r, espesor, x, y, up, down
        fila = StringGrid1->Cells[0][i_i]+", "+ StringGrid2->Cells[c_f][y_i]+", "+
              StringGrid2->Cells[c_h][y_i]+", "+StringGrid1->Cells[4][i_i]+", "+
              StringGrid1->Cells[3][i_i]+", "+StringGrid2->Cells[c_x][y_i]+", "+
              StringGrid2->Cells[c_y][y_i]+", "+StringGrid2->Cells[c_z][y_i]+", "+
              down;
        list->Add(fila); //Se agrega al archivo
    }
    //Si no coinciden la hora de radar con la hora GPS
    else
    {
        if(StringGrid1->Cells[3][i_i!="")//Si hay espesor
        {
            list->Add(Interpolar(i_i,y_i)); //Se realice la interpolacion
            //Ver algoritmo pagina siguiente
        }
        //Si hay otro dato
        if(StringGrid1->Cells[4][i_i+1!=""))
        {
            i_i++;
            //Se asigna la hora de radar y se repite el proceso
            horaRadar = StrToTime(StringGrid1->Cells[4][i_i]);
        }
    }
}

if(SaveDialogFinal->Execute())
{
    //Se guardan los datos a un archivo
    list->SaveToFile(SaveDialogFinal->FileName);
}
```

Interpolación

```
AnsiString __fastcall TConeccionForm::Interpolar(int pos_radar,int pos_gps)
{
    TTime hora;
    String linea, down;
    int segundosGps,minutos,segundosRadar;
    double DeltaD,Deltad,X1,Y1,X2,Y2,Z1,Z2,x,y,z;
    AnsiString fila;
    //diferencia de horas GPS (intervalo donde se encuentra la hora de radar)
    hora = StrToTime(StringGrid2->Cells[c_h][pos_gps])-
        StrToTime(StringGrid2->Cells[c_h][pos_gps-1]);
    linea = TimeToStr(hora); //*****
    minutos = StrToInt(linea.SubString(4,2)); //**
    segundosGps =StrToInt(linea.SubString(7,2)); //** Se pasa la hora a segundos **
    segundosGps = (minutos * 60)+segundosGps; //*****
    //diferencia de horas gps con radar
    hora = StrToTime(StringGrid1->Cells[4][pos_radar])- //hora radar
        StrToTime(StringGrid2->Cells[c_h][pos_gps-1]); //hora GPS
    linea = TimeToStr(hora); //*****
    minutos = StrToInt(linea.SubString(4,2)); //**
    segundosRadar =StrToInt(linea.SubString(7,2)); //** Se pasa la diferencia a seg.**
    segundosRadar = (minutos * 60)+segundosRadar; //*****
    //Se asignan a las variables los respectivos valores según elección del usuario
    X1 = StrToFloat(StringGrid2->Cells[c_x][pos_gps]);
    X2 = StrToFloat(StringGrid2->Cells[c_x][pos_gps-1]);
    Y1 = StrToFloat(StringGrid2->Cells[c_y][pos_gps]);
    Y2 = StrToFloat(StringGrid2->Cells[c_y][pos_gps-1]);
    Z1 = StrToFloat(StringGrid2->Cells[c_z][pos_gps]);
    Z2 = StrToFloat(StringGrid2->Cells[c_z][pos_gps-1]);
    x = sqrt((X1-X2)*(X1-X2)); //delta X
    y = sqrt((Y1-Y2)*(Y1-Y2)); //delta Y
    z = sqrt((Z1-Z2)*(Z1-Z2)); //delta Z
    //El primer punto es (X2,Y2,Z2), y este punto puede aparecer en 4 posiciones para el
    //plano (X,Y) y en dos posiciones para el plano Z

    if((X1<X2)&&(Y1<Y2)) //Posición 1 plano (X,Y)
    {
        x = X2-((segundosRadar*x)/segundosGps);
        y = Y2-((segundosRadar*y)/segundosGps);
    }

    else if ((X2<X1)&&(Y2<Y1)) //Posición 2 plano (X,Y)
    {
        x = X2+((segundosRadar*x)/segundosGps);
        y = Y2+((segundosRadar*y)/segundosGps);
    }

    else if ((X2<X1)&&(Y2>Y1)) //Posición 3 plano (X,Y)
    {
        x = X2+((segundosRadar*x)/segundosGps);
        y = Y2-((segundosRadar*y)/segundosGps);
    }

    else if ((X1<X2)&&(Y1>Y2)) //Posición 4 plano (X,Y)
    {
        x = X2-((segundosRadar*x)/segundosGps);
        y = Y2+((segundosRadar*y)/segundosGps);
    }

    if(Z1<Z2) z = Z2-((segundosRadar*z)/segundosGps); //Posición 1 plano Z
    else z = Z2+((segundosRadar*z)/segundosGps); //Posición 2 plano Z
    //Se calcula el valor de topografía subglaciár
    down = FloatToStr(z - StrToFloat(StringGrid1->Cells[3][pos_radar]));
    //guardamos los datos en un String
    //id r, fecha, hora gps, hora r, espesor, x, y, up, down
    fila = StringGrid1->Cells[0][pos_radar]+", "+
        StringGrid2->Cells[c_f][pos_gps-1]+", "+
        StringGrid2->Cells[c_h][pos_gps-1]+", "+StringGrid1->Cells[4][pos_radar]+
        ", "+StringGrid1->Cells[3][pos_radar]+", "+AnsiString(x)+
        ", "+AnsiString(y)+", "+AnsiString(z)+", "+down;
    //Retornamos el string recién hecho (fila)
    return fila;
}
```