

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Postgrados

**Sistema de Información Geográfica aplicado a la Generación del DEM
de la Punta Fort William, Antártida: "MaldonadoGIS"**

Dany Mauricio Salazar González

**Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de Maestría
en Sistemas de Información Geográfica**

Quito

Septiembre de 2012

Universidad San Francisco de Quito

Colegio de Postgrados

HOJA DE APROBACION DE TESIS

Sistema de Información Geográfica aplicado a la Generación del DEM de la Punta Fort
William, Antártida: "MaldonadoGIS"

Dany Mauricio Salazar González

Richard Resl, M.Sc.
Director de Tesis
Director del Programa de
Maestría en Sistemas de Información Geográfica

Karl Atzmanstorfer, M.Sc.
Miembro del Comité de Tesis

Stella de la Torre, Ph.D.,
Decana del Colegio de
Ciencias Biológicas y Ambientales

Victor Viteri Breedy, Ph.D.,
Decano del Colegio de Posgrados

Quito, Septiembre de 2012

© Derechos de autor
Dany Mauricio Salazar González
2012

© Derechos de autor: Según la actual Ley de Propiedad Intelectual, Art. 5:
“el derecho de autor nace y se protege por el solo hecho de la creación de la obra, independientemente de su mérito, destino o modo de expresión... El reconocimiento de los derechos de autor y de los derechos conexos no está sometido a registro, depósito, ni al cumplimiento de formalidad alguna.” (Ecuador. Ley de Propiedad Intelectual, Art. 5)

Inscribir el derecho de autor es opcional y si el estudiante lo decide debe inscribir los derechos de autor en el Instituto Ecuatoriano de Propiedad Intelectual (IEPI). Si lo va a hacer internacionalmente debe tomar en cuenta las normas internacionales para microfilmado.

Dedicatoria

Al Señor mi Dios, a mis padres Rosi y Londres, a mi esposa Verónica, a mis hermanos John y Paúl, a mi abuelos Paulina, José e Isaías, a mis tíos, y demás familiares y amigos que me ha ayudado en esta etapa de mi vida.

Agradecimientos

Instituto Antártico Ecuatoriano (INAE) por el valioso aporte logístico y excelente administración científica, a su Director M.Sc. Hernán Moreano por su confianza, al Instituto Oceanográfico de la Armada (INOCAR) y su geodesta Luis Burbano por aportar esfuerzo físico, científico y técnico. A la Universidad Estatal Península de Santa Elena a (UPSE) por su apoyo logístico y de administración científica a través del Instituto de Investigaciones Científicas y Desarrollo Tecnológico - INCYT y el Centro de Estudios Integrales y del Ambiente – CEIDA y su Director M.Sc. Johnny Chavarría. A la Universidad San Francisco de Quito por la formación científica proporcionada a través del Máster en Sistemas de Información Geográfica y su Director M.Sc. Richard Resl, que me ha impartido sus conocimientos en la tutoría de la tesis.

Resumen

MaldonadoGIS se presenta como un sistema de información geográfica que servirá de apoyo a la investigación científica geoinformático de Ecuador en la Antártida. El autor ha propuesto diferentes etapas en cuanto al desarrollo de este sistema, se centra en el primero en el presente trabajo de tesis, cuyo objetivo es evaluar las técnicas adecuadas de interpolación para la generación de un modelo digital de elevación destinados al mejoramiento del análisis global espacial realizado en Fort William en Punta Greenwich Island - Islas Shetland del Sur. Criterios de selección, basado en el valor mínimo del error cuadrático medio (RMSE acrónimo) de los valores de altitud obtenidos por los modelos, se utilizaron para evaluar el ajuste de los puntos de control medidos de tierra. Entre los resultados relevantes obtenidos, la generación del Modelo Digital de Elevación (DEM), mapa topográfico de pendientes, cuencas y sub-cuencas hidrográficas se pueden resaltar.

Palabras clave: Modelo de Elevación Digital (DEM), en la Antártida, las técnicas de interpolación.

Abstract

MaldonadoGIS is presented as a Geographic Information System that will provide a geoinformatic support to scientific research of Ecuador in Antarctica. The author has proposed different stages regarding the development of this system, focusing on the first one within this thesis paper, which aims at evaluating suitable interpolation techniques to generate a digital elevation model meant for the overall improvement of spatial analysis performed in Fort William in Punta Greenwich Island - South Shetland Islands. Selection criteria, based on the minimum value of root mean squared error (RMSE acronym) of the obtained altitude values by the models, were used to evaluate the fit to the measured ground control points.

Among the relevant results obtained, the generation of Digital Elevation Model (DEM), topographic map of slopes, basins and sub-basins can be highlighted.

Keywords: Digital Elevation Model (DEM), Antarctica, interpolation techniques.

Tabla de Contenido

1. Introducción	2
1.1. Organismos del SCAR y el INAE	2
1.2. Zona de Estudio	2
1.3. Antecedentes históricos de datos geográficos en la Punta Fort William.....	3
2. Objetivos	6
2.1. Objetivo General.....	6
2.2. Objetivos Específicos	6
3. Metodología	7
3.1. Fase de Recolección	7
3.2. Fase de Tratamiento.....	9
3.3. Fase de Modelamiento.....	10
3.3.1. Generación de los modelos	10
3.3.2. Validación de los modelos	11
4. Resultados	12
4.1. Generación del DEM de la Punta Fort William utilizando TIN.....	12
5. Discusión.....	17
6. Conclusiones	19
7. Recomendaciones y perspectivas en futuros proyectos	20
8. Bibliografía.....	22

Lista de figuras

<i>Figura 1.</i> a. Digitalización de la Topográfico en 2d (1990) usando Intergraph, b. Levantamiento Topográfico en 2D (2007) Microstation (CAD), c. Levantamiento Topográfico en 2D (2008) Microstation (CAD), d. Puntos geodésicos levantados 2008, e. Mapa Topográfico 2008	5
<i>Figura 2</i> Mapa Topográfico de la Punta Fort William	12
<i>Figura 3</i> Mapa de Pendientes de la Punta Fort William	14
<i>Figura 4.</i> a. Caudales, b. Cuencas y microcuencas, c. Puntos Geodésicos 2009, d. DEM.	15
<i>Figura 5.</i> a. Grupos de diferencias entre valor predicho y valor real sobre el mapa de pendientes	16

Lista de Tablas

<i>Tabla 1.</i> Raíz del Error Medio Cuadrático de los modelos DEM por tamaño de muestra y su porcentaje de representatividad	11
<i>Tabla 2.</i> Puntos de Discusión en las fases de desarrollo de la investigación.....	18

1. Introducción

1.1. Organismos del SCAR y el INAE

Las actividades científicas en la Antártida son coordinadas por el Comité Científico de Investigaciones Antárticas (SCAR siglas en inglés). El SCAR está compuesto por grupos y comisiones permanentes científicas, resaltando una de las más antiguas, la Comisión Permanente de Antártida Información Geográfica (SC-AGI siglas en inglés) coordina el mapeo y gestión de la información geoespacial como soporte a la investigación en la Antártida y el Grupo Permanente Científico de Geociencia (SSG-GS siglas en inglés). Dentro de los proyectos más relevantes del SC-AGI, se encuentra la Infraestructura de Datos Espaciales Antárticos (AntSDI siglas en inglés), cuyo objetivo es estandarizar datos espaciales para su uso y capacidad óptima de la información por parte de la comunidad antártica. En Ecuador, las actividades antárticas son administradas por el Instituto Antártico Ecuatoriano INAE dispone de un Consejo Directivo, la Dirección Ejecutiva, los Departamentos Científico, Técnico y Administrativo-Financiero y de un Órgano de Asesoramiento constituido por el Grupo Asesor Científico, conformado por investigadores delegados de varias entidades académicas y de investigación pública y privada, estructurado bajo los mismos lineamientos y principios del SCAR y que se regula por su propio reglamento.

1.2. Zona de Estudio

La Punta Fort William está ubicada en la Zona 21S, proyección UTM, DATUM WGS-84, en el sector noreste de la Isla Greenwich, perteneciente al conjunto de Islas Shetland del Sur, parte septentrional de la Península Antártica.

1.3. Antecedentes históricos de datos geográficos en la Punta Fort William

La toponimia de la punta estuvo dado inicialmente por los ingleses en la Expedición Antártica Inglesa de 1935, Discovery II (Urbina, G. et al, 1990) y utilizada en los estudios de investigación científica realizadas en la zona, luego se agregaron toponimia ecuatoriana en las que se hace referencia en las diferentes investigaciones realizadas en las expediciones ecuatoriana a la Antártida. Así tenemos, que en la I Expedición ecuatoriana a la Antártida, la Armada Naval ecuatoriana realiza el reconocimiento y el levantamiento de parámetros de físicos y ambientales para la construcción de la Estación Científica Ecuatoriana Pedro Vicente Maldonado, llamada así en honor al célebre geodésico riobambeño, quien participó en el grupo de científicos la Segunda Misión Geodésica Francesa, que en 1745 establecieron a Quito como el sitio donde pasa el arco de mayor dimensión del planeta Tierra o línea ecuatorial (Wolfgang, V., 1946).

Luego, durante la II Expedición ecuatoriana a la Antártida, un grupo de investigadores del Instituto Geográfico Militar ecuatoriano generaron el primer mapa topográfico utilizando de fotos aéreas de 1986, tomadas por el Servicio Aéreo de Chile (Urbina, G. et al, 1990). Entre los resultados obtenidos tenemos la visualización del mapa topográfico de la Punta Fort William y los parámetros geodésicos, DATUM WGS-84, Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM), Zona 21S (ver la Figura 1.a).

Posteriormente, en la VIII expedición se recolectaron datos geodésicos de líneas de costa de la Punta Fort William, delimitaciones de los Glaciares Quito y Traub y el contorno de la base de los cerros adyacentes a los glaciares, por medio de la utilización de equipos de GPS L1 simple frecuencia (ver la Figura 1.b).

Sin embargo, desde la XI Expedición Ecuatoriana a la Antártica se inicia las primeras pruebas de levantamiento topográfico de la Punta Fort Williams por medio de GPS L2 de

doble frecuencia, levantando contornos de rocas, límites de lagunas de agua dulce, cordones litorales y línea de costa en la ensenada Guayaquil en el monitoreo de los límites de los glaciares Quito y Traub (ver la Figura 1.c).

Para la XII Expedición, el grupo de Geodesia y Glaciología del INAE planifica la generación del Modelo de Elevación Digital de la Punta Fort William, estableciéndose como la primera versión, cuya visualización estaría dada en 2 y 3 dimensiones, lo cual ha permitido analizar espacialmente el comportamiento dinámico del retroceso de los glaciares y sus efectos e impactos en la topografía de la punta (Burbano, L., 2008) (ver la Figura 1.d, 1.e). Cabe destacar, que en esta campaña se unieron al Grupo de Geodesia del INAE, dos científicos de universidades de Malasia. Sin embargo, se obtuvieron resultados limitados, el DEM resultante presentaba visualización inadecuada dada a la interpolación de extensas áreas no recolectadas, esto fue debido principalmente a las condiciones ambientales inapropiadas para el desarrollo del plan de recolección de puntos geodésicos.

En consecuencia, el grupo de Geodesia y Glaciología levanta una nueva serie de puntos geodésicos completando la malla planificada durante la XIII Expedición ecuatoriana. Como resultado preliminar, se presenta una comunicación de trabajo en el V Simposio Latinoamericano sobre Investigaciones Antárticas desarrollado en la Universidad Estatal Península de Santa Elena - UPSE, La Libertad-Ecuador con resultados preliminares del DEM y propuesta del sistema de información geográfica que contendría los datos espaciales de las investigaciones ecuatorianas en la Antártida.

Con estos antecedentes históricos, el autor propone desarrollar el sistema de información geográfico MaldonadoGIS.

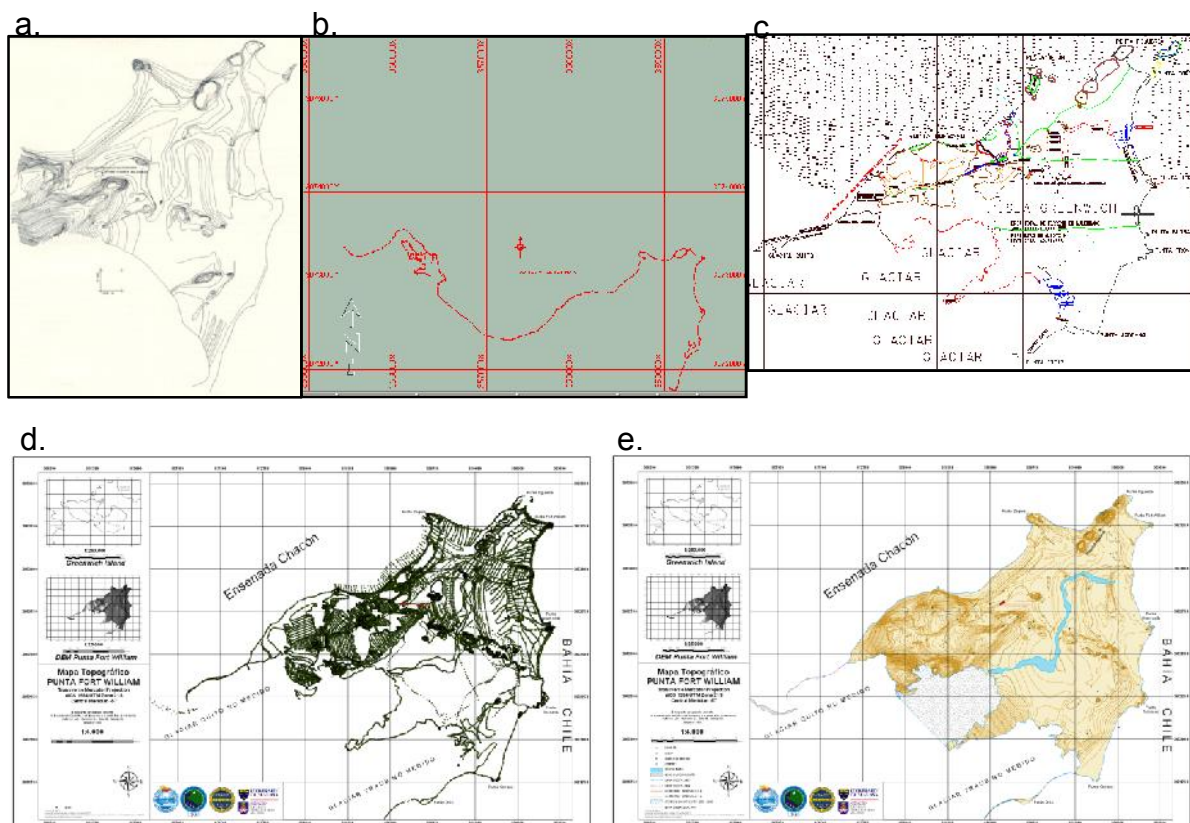


Figura 1. a. Digitalización de la Topográfico en 2d (Urbina et al., 1990) usando Intergraph, b. Levantamiento Topográfico en 2D (Burbano, 2007) Microstation (CAD), c. Levantamiento Topográfico en 2D Microstation (CAD) (Burbano, 2008), d. Puntos geodésicos levantados (Burbano, 2008), e. Mapa Topográfico (Salazar et al., 2008)

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

El presente trabajo tiene como objetivo general evaluar las técnicas adecuadas de interpolación para la generación de un modelo digital de elevación destinados al mejoramiento del análisis global espacial realizado en Fort William en Punta Greenwich Island - Islas Shetland del Sur.

2.2. Objetivos Específicos

El objetivo general es cumplido a partir de dos objetivos específicos:

- Generar el DEM partir de la selección de un técnica de interpolación idóneo para el mejoramiento del análisis espaciales realizados en la Punta Fort William.
- Generar mapas de terreno por medio del DEM para el entendimiento del comportamiento geomorfológico, exploratorio de la Punta Fort William

En este sentido, se ha desarrollado el presente documento para explicar los materiales y métodos utilizados desde la recolección y tratamiento de los datos que sirvieron como insumos, la metodología de selección de la técnica de interpolación utilizada y los resultados esperados son el modelo de elevación digital en dos dimensiones, mapa topográfico y de pendientes.

3. Metodología

Para el desarrollo de la generación del DEM y mapas de terrenos de la Punta Fort William se ha planteado en cuatro fases: Recolección, Tratamiento, Modelamiento y Resultados (Ver Diagrama).

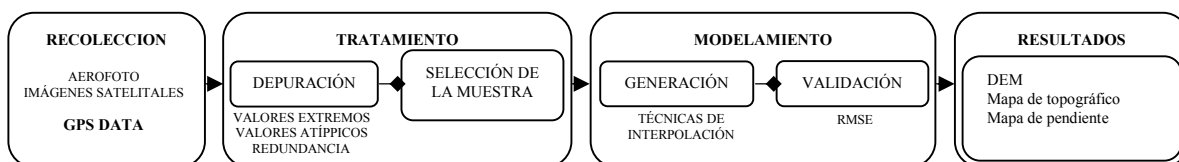


Diagrama. Esquema de las Fases de Desarrollo de la investigación.

Fuente: Generado por Dany M. Salazar, 2012.

3.1. Fase de Recolección

En esta fase, se analizaron diferentes alternativas de fuente de datos, entre las principales tenemos imágenes satelitales y puntos de obtenidos equipos con sistema posicionamiento global (GPS siglas en inglés). En este sentido, se recolectaron imágenes Landsat 7 del proyecto Landsat Image Mosaic of Antarctica - LIMA, del SCAR y la NASA que pone a disposición imágenes de seis bandas espectrales (30 metros de resolución espacial), dos bandas térmicas (resolución de 60 metros) y una banda pancromática (resolución de 15 metros) (Robert Bindschadler, 2007), sin embargo para la área de estudio presenta por consecuencia una inadecuada información. Sin embargo, se evidenciaron problemas de captación de información debido a la alta nubosidad correspondiente a las malas condiciones meteorológicas registrada en la zona.

Por otro lado, una alternativa idónea por su ejecución fue la recolección de datos geodésicos por medio de GPS de alta precisión, pese a que esto implicaba un costo logístico y humano, presentaba como la mejor alternativa en el escenario anteriormente presentado. El procedimiento fue ejecutado por un solo geodesta por caminamiento en un

área de 14 Has, durante tres expediciones XI, XII y XIII siendo esta última recolección la seleccionada para la generación del DEM del presente estudio.

Otro paso a considerarse, fue la verificación de los parámetros utilizados por el equipo de GPS y los estándares establecidos por el SCAR y el SC-AGI. Para ello se analizaron las resoluciones vigentes de los organismos rectores de esta temática en la zona de estudio. De esta manera, la estandarización aplicada en el programa AntSDI del SC-AGI, donde se establece adoptar el Internacional Terrestrial Reference Frame 2000 (ITRF2000) junto con el elipsoide GRS80 como Datum geodésico para todas las actividades antárticas, esta resolución permanente fue firmada por los países miembros del Tratado Antártico. (SCAR XXVII, Shanghái 2002). Dado a que los datos geodésicos del estudio están en el Datum WGS84 se verifica su relación con el ITRF para su transformación respectiva, sin embargo, bajo precisiones horizontal y vertical de 10 cm. o menores son coincidentes, además el elipsoide WGS84 puede considerarse idéntico al elipsoide GRS80, con la diferencia de definir ciertos parámetros pero no afecta a las aplicaciones de mapeo (sitio web de SCAR). Consecuentemente, debido a que se utilizaron equipos GPS L2 de doble frecuencia con precisiones centimétricas, se verifica la parametrización de los datos geodésicos y la normativa existente.

Los materiales utilizados en la recolección de datos utilizados son los siguientes:

- Equipo Trimble GPS serie 4700, doble frecuencia, con libreta electrónica TSC2 y antena de mochila, con una antena estación base receptora.

La metodología aplicada para el levantamiento de los puntos de GPS, realizada por el investigador del INOCAR¹, consistía en una medición cinemática trazando caminamientos en el terreno, línea de costa y límite de los glaciares. El plan de recolección de puntos

¹ Investigador geodesta Luis Burbano del Instituto Oceanográfico de la Armada - INOCAR y Jefe del Grupo de Geodesia y Glaciología del INAE.

estuvo establecido recorriendo perfiles cada 10 metros, registrando puntos cada 5 metros, totalizando de 200 km. de caminata y 78,187 puntos (tridimensionales) de alta precisión, y en las conformaciones rocosas su espaciamiento fue de 2m de distanciamiento. Cabe resaltar, que los DEM pueden ser regulares o irregulares, estos últimos son aquellos pueden ser generados por puntos con pequeños espaciamientos para altos relieves y grandes espaciamientos para pequeños relieves, esto se evidencia en nuestra zona de estudio, cuenta con sectores montañosos y rocosas (Shary 2008).

3.2. Fase de Tratamiento

Se realizaron operaciones de depuración con respecto a valores atípicos y extremos, y la redundancia de datos. Para ello se utilizaron las técnicas estadísticas exploratorias de datos de los paquetes computacionales Trimble Geomatics Office, Terramodel Visualiser, MicroStation, eliminando los valores que se encontraban fuera del comportamiento normal de sus vecinos, además esta acción se verificaba visualmente utilizando el módulo de ArcScene de software ArcGIS 9.3.

Asimismo, para la detección de la redundancia de datos se ha utilizado filtros y consultas en el gestor de base de datos PostgreSql y ArcGIS 9.3. Cabe resaltar, que los errores de redundancia se debieron principalmente al unir las tablas de datos GPS levantados jornadas diarias durante el periodo de recolección, produciendo valores con el misma localización pero diferentes valores de altitud.

Luego, se realiza la selección de una muestra de puntos GPS que permita validar los modelos interpolados de la zona de estudio. Para este efecto, se utiliza la herramienta Geostatistical Analysis Tools de ArcGIS 9.3. De esta manera 78,187 puntos geodésicos fueron analizados, de los cuales la primera muestra de tamaño 500 representa el 0,64% del total de puntos y la segunda muestra de tamaño 1000, el 1,28%, ambas significativas al

95% de confianza, con un error de muestreo 3%. Cabe destacar, que estos puntos de control no fueron utilizados en los modelos de interpolación.

3.3. Fase de Modelamiento

Dentro del desarrollo de esta base se ha planteado la generación de los modelos a partir de técnicas de interpolación y posteriormente se realiza la validación por medio de la medición de la variabilidad de los puntos de control en los modelos generados.

3.3.1. Generación de los modelos

Se procede a generar modelos de elevación a partir de técnicas de interpolación revisadas entre las cuales se encuentra Kriging Ordinario, Distancia Inversa Ponderadas (IDW siglas en inglés), Polígonos de Voronoi y Red Triangulada Irregular (TIN siglas en inglés), estos modelos fueron llevados a formato raster con celdas de tamaño 2m para posteriormente extraer los valores correspondientes en los puntos de control seleccionados en las dos muestras. Para tener un mejor entendimiento del modelo seleccionado, hacemos una breve descripción de la técnica, así tenemos que TIN (Triangulated Irregular Network, siglas en inglés) que es un método matemático que une los puntos espaciales en triángulos para convertir un DEM irregular en regular cuyo fundamento teórico se basa en los Triángulos de Delaunay (Ripley 1970) (Shary referencia en Akima 1978). Posteriormente se convirtió el modelo TIN en Raster para la suavización del terreno, agregándoles el proceso de Hillshade para darle un aspecto, aproximadamente, real a la topografía modelada (Chang 2008) y (Olea 1999).

3.3.2. Validación de los modelos

Por otro lado, la metodología de validación para los modelos generados está basada en para encontrar el valor mínimo de la Raíz del Error Medio Cuadrático (RMSE siglas en inglés) de los valores de altitud generados por los modelos en puntos espaciales conocidos llamados de control. Este criterio ha sido utilizado para valorar modelos generados por técnicas estadísticas que se encuentran en módulos de diferentes paquetes informáticos de datos espaciales (Bosque et al., 2001), y en el análisis de sensibilidad para la optimización de celdas un DEM regular en formato raster de un modelo de interpolación en particular (Чепелев, О. et al, 2010). La fórmula del RMSE implementada es la siguiente:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X_i - Y_i)^2}{n}}$$

X_i = Altitud del modelo generado en las coordenadas UTM del punto de control i

Y_i = Altitud del punto de en las coordenadas UTM del punto de control i

n = Número de puntos de la muestra

n	RMSE				REPRESENTATIVIDAD TOTAL= 78187 PUNTOS
	TIN	VORONOI	IDW	KRIGING ORDINARIO	
500	0,46	0,66	0,74	1,56	0,64%
1000	0,38	0,61	0,67	1,36	1,28%

Tabla 1. Raíz del Error Medio Cuadrático de los modelos DEM por tamaño de muestra y su porcentaje de representatividad

Fuente: Generado por Dany M. Salazar, 2012.

Así tenemos, que en la Tabla 1 muestra los valores RMSE de los modelos generados siendo TIN la técnica de menor valor del indicador, seguida de los Polígonos de Voronoi, IDW y Kriging Ordinario, en orden ascendente respectivamente.

4. Resultados

Una vez seleccionado el TIN como técnica de interpolación, se procede a generar el DEM final y los mapas de terreno de la Punta Fort William. Para tal efecto, se presenta los pasos y parámetros utilizados.

4.1. Generación del DEM de la Punta Fort William utilizando TIN

- Importación de los datos en la aplicación ArcCatalog para convertirlos en archivos shape.
- Se utiliza el shape para procesarlos espacialmente en 2D y 3D en los siguientes métodos:
 - Modelamiento por el método de TIN
 - Modelamiento en Raster por medio de la conversión TIN-Raster, cuyos parámetros son los siguientes:
 - Tipo de dato Float.
 - Método de interpolación Natural Neighbors.
 - El tamaño de la celda 2m
 - Modelamiento del de la superficie del Raster:
 - Aspecto.
 - Hillshade con parámetros: Azimuth de 270°, Altitud de 45°
 - Pendientes.
- Líneas de contorno con intervalos cada 5m de altura.
- Modelamiento de los datos en 3D con la aplicación ArcScene:
 - Altura base (Base Heights).
 - Simbología: Clasificado por Cuantiles, parámetro: 30

→ Remuestreo de visualización con el método de interpolación Bilinear para datos continuos.

Luego de generar el DEM de la Punta Fort William en GIS se obtuvo los siguientes mapas a escala de 1:4000:

- a. Mapa de Topográfico con intervalos cada 5 m de altura, caudales, cuencas y sub-cuencas, por medio de la herramienta Hydrology del ArcGIS 9.3. En este procedimiento, el raster del DEM se depura con la herramienta Fill que permite cubrir aquellas celdas que no fueron valoradas por la rasterización. Luego se genera el flujo de dirección, permitiendo identificar los caudales principales (ver Figura 4.a) y posteriormente la elaboración de las cuencas y sub-cuencas (ver Figura 4.b).
- b. Mapa de Pendientes. Este mapa se genera a partir del DEM, utilizando la opción de Slope de la herramienta Spatial Analysis del ArcGIS 9.3.

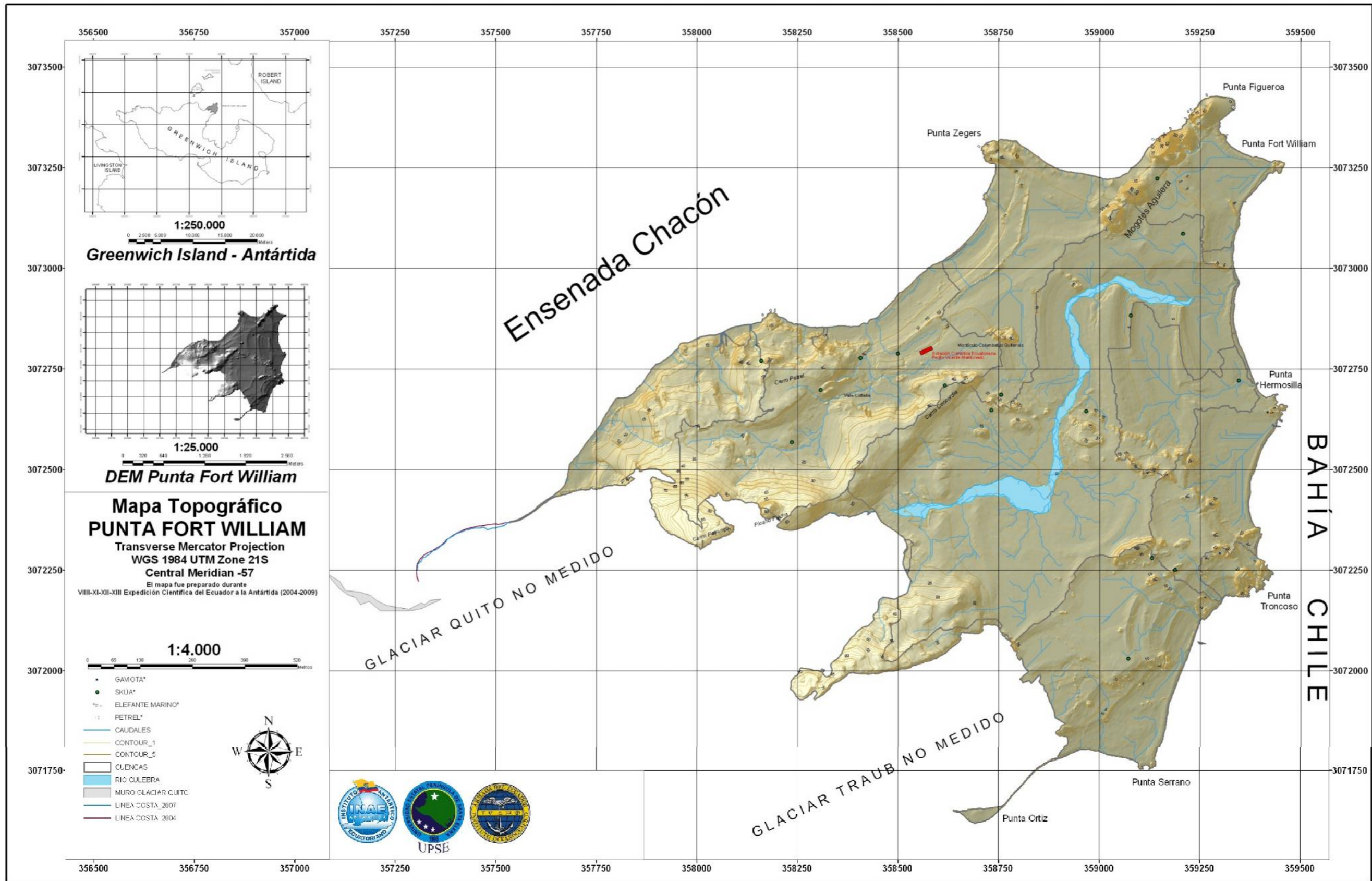


Figura 2. Mapa Topográfico de la Punta Fort William. Autor: Dany M. Salazar, 2012

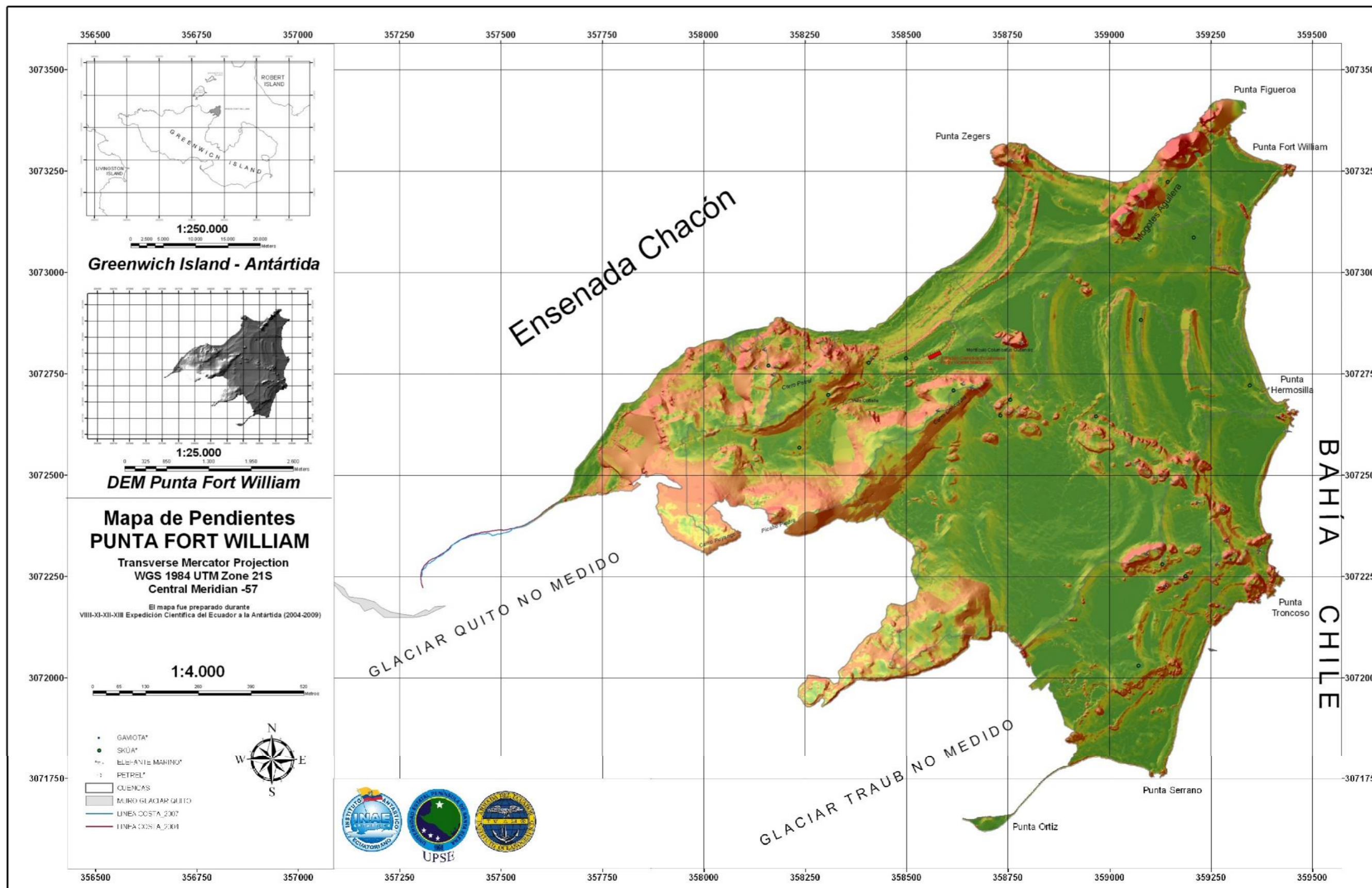


Figura 3. Mapa de Pendientes de la Punta Fort William. Fuente: Dany M. Salazar, 2012

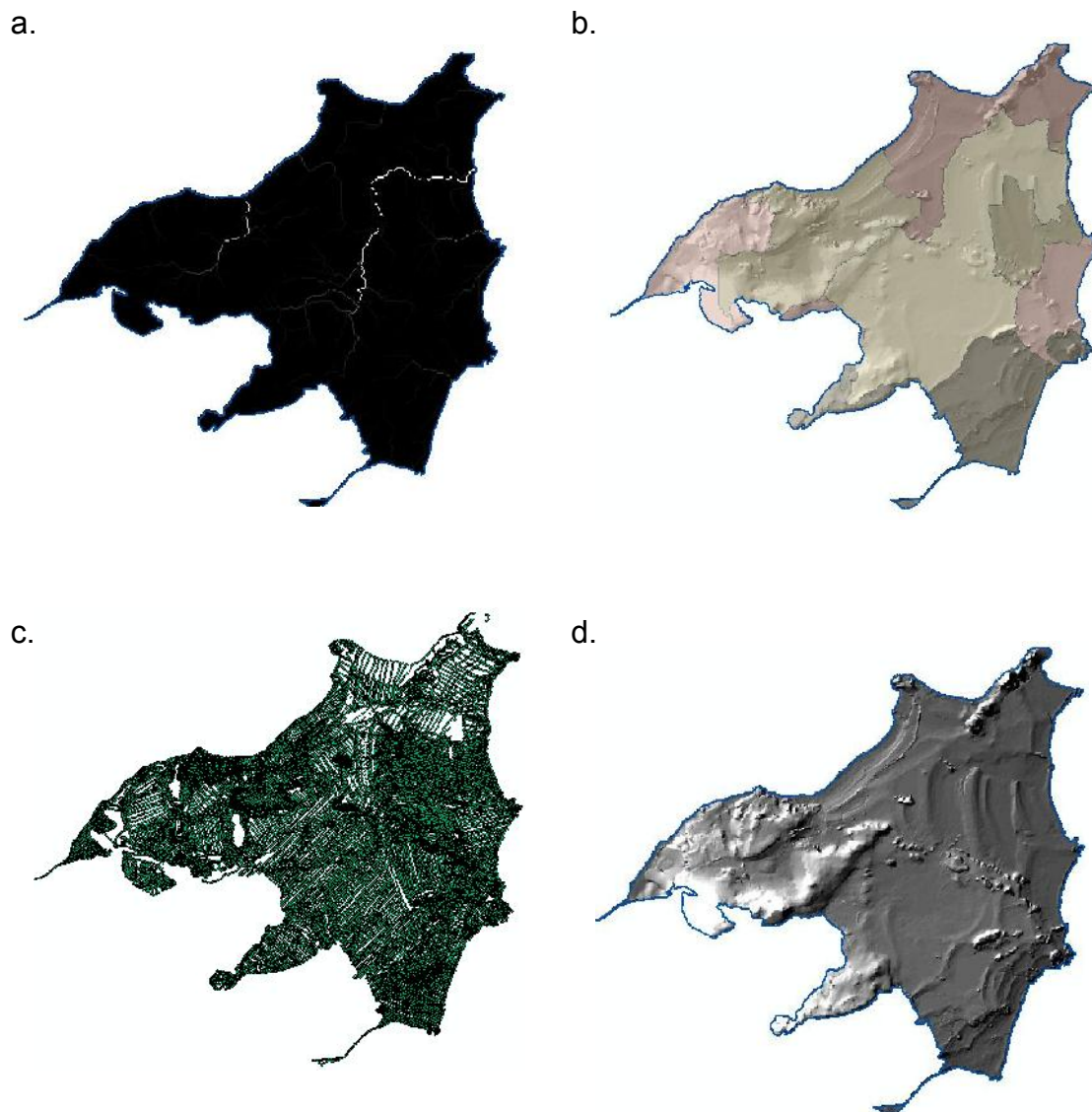


Figura 4. a. Caudales, b. Cuencas y microcuencas, c. Puntos Geodésicos 2009, d. DEM.

Fuente: Generado por Dany M. Salazar, 2012.

5. Discusión

Los resultados fueron generados mediante la aplicación de las metodologías de la literatura revisada descritas en la sección 2. Sin embargo, se observaron ciertos puntos de Discusión que se resaltan en la presente sección, tales como limitaciones, deficiencias, beneficios, costos, alternativas en las diferentes fases de la investigación.

Fases de la investigación	Puntos de Discusión	Descripción
Recolección	Limitaciones	El caminamiento sólo en terreno descubierto y no sobre glaciares por su peligrosidad de la estructura del glaciar y variabilidad meteorológica de la zona.
	Costos	Los equipos GPS pertenecen al INOCAR. Los costos de logística de traslado, alimentación y viáticos de los investigadores de Geodesia fueron cubiertos por el INAE.
	Deficiencias	El tiempo del levantamiento fue desarrollado en dos expediciones ecuatorianas a la Antártica (XII y XIII).
	Beneficios	<ul style="list-style-type: none"> • Se ha logrado la experticia de la metodología de levantamiento. • Se posee una base de puntos geodésicos.
	Alternativas	<ul style="list-style-type: none"> • Aerofotos. • Imágenes satelitales • Interferometría radar
Tratamiento	Limitaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Depende que exista un grupo de datos depurados en postproceso. • Utilización de puntos levantados como valores de control de la muestra.
	Costos	<ul style="list-style-type: none"> • Costo cero en adquisición del software del GPS viene con el Equipo Trimble y PostgreSQL software libre. • Adquisición de una licencia de ArcGIS 9.3 • Adquisición de un ordenador portátil características potentes: 8GB de RAM, Procesador Intel Core i5 o mayores.
	Deficiencias	Depuración manual en el análisis visual o en la detección de valores atípicos y extremos.
	Beneficios	Base de datos depurada.
	Alternativas	Proceso automatizado de eliminación de puntos.

Tabla 2. Puntos de Discusión en las fases de desarrollo de la investigación.

Fuente: Autor. Dany M. Salazar (2012)

Fases de la investigación	Puntos de Discusión	Descripción
Modelamiento	Limitaciones	Sólo se utilizaron tres tipos de técnicas de interpolación. Utilización de otros indicadores estadísticos que mida la aleatoriedad y propagación de errores y su respectivo análisis de sensibilidad.
	Costos	Se utilizaron la licencia de ArcGIS 9.3 y el ordenador portátil.
	Deficiencias	Falta de un proceso automatizado.
	Beneficios	Validación de modelos con diferentes técnicas de interpolación.
	Alternativas	Otras técnicas de Modelamiento como distancia inversa ponderada (IDW siglas en inglés), Método de los medias (promedios), móviles ponderados, splines, entre otros.
Resultados	Limitaciones	En conocimientos en Hidrología para el fortalecimiento conceptual en la elaboración del mapa hidrológico.
	Costos	Impresiones de productos cartográficos.
	Deficiencias	-
	Beneficios	Soporte a los investigadores con insumos cartográficos bases y temáticas de terreno de la Punta Fort William
	Alternativas	Productos interactivos y dinámicos al subir la información geográfica generada a una GISWeb permitiendo una accesibilidad y portabilidad adecuada para varios usuarios en diferentes dispositivos móviles GPS exploradores, tablets y Smartphone.

Cont. Tabla 2. Puntos de Discusión en las fases de desarrollo de la investigación.
Fuente: Autor. Dany M. Salazar (2012)

Otro punto de discusión que podemos mencionar es el evidenciado gráficamente en el comportamiento de las mayores diferencias absolutas entre los valores de los puntos de control y los generados por lo modelos se encontraban, en su mayoría, en los píxeles de alta pendiente. Esto podría significar una debilidad en la técnica TIN, lo que conllevaría a cuestionar cual sería el número de puntos geodésicos adecuado para elementos espaciales de características montañosas o de alta pendiente. Otra opción sería analizar el comportamiento en estos elementos en los otros modelos y seleccionar el mejor modelo en sectores particulares.

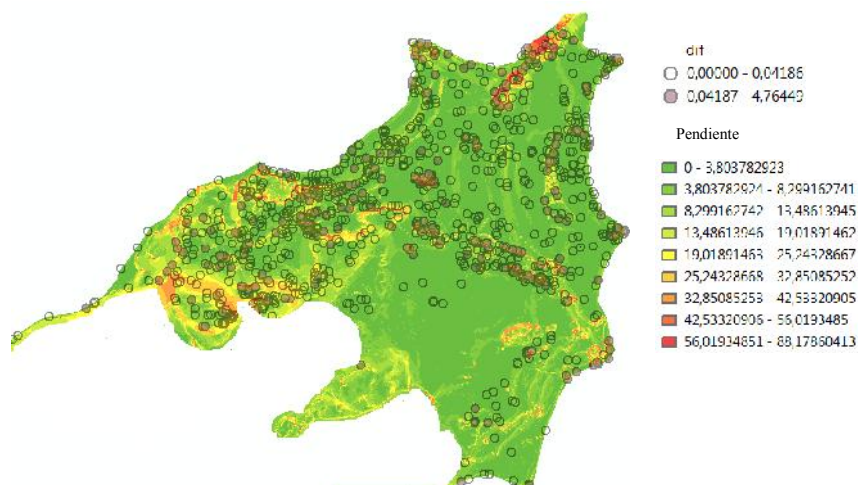


Figura 5. Grupos de diferencias entre valor predicho y valor real sobre el mapa de pendientes. Fuente: Generado por Dany M. Salazar, 2012.

6. Conclusiones

El TIN fue la técnica de interpolación idónea para la generación del DEM de la Punta Fort William – Antártida.

El RMSE ha sido un buen discriminador para representar la variabilidad entre valores reales y los modelados de una variable, en nuestro caso particular la altitud de la zona de estudio. Los equipos geodésicos funcionaron exitosamente considerando el ambiente hostil de la zona Antártica. La metodología de recolección de puntos espaciales por medio de caminamientos funciona zonas donde el terreno es fácil acceso.

El Datum WGS84 utilizado en el estudio con puntos de precisión centimétrica se adapta al ITRF2000 DATUM estándar del SCAR.

El DEM Punta Fort Williams es considerado el mapa base que será utilizado para las investigaciones antárticas ecuatorianas.

El DEM generado ha permitido obtener de forma satisfactoria las cuencas y sub-cuencas hidrográficas, y caudales.

7. Recomendaciones y perspectivas en futuros proyectos

La utilización de MaldonadoGIS por los investigadores antárticos está dado, principalmente, por la identificación de las alturas en la zona de estudio y las posibles correlaciones que tenga sus variables de interés con respecto a la altitud, pendientes y su hidrología con respecto al deshielo de los glaciares existentes. Tal es el caso del grupo de ornitólogos, cuya investigación tiene como objetivo principal la identificación e inventario de los anidamientos de aves marinas como los petreles, skúas, gaviotas y pingüinos, los mapas permitirían identificar patrones de anidamientos y zonificarlos a través de un modelo geoestadístico utilizando las alturas del DEM.

Asimismo, los biólogos que realizan el proyecto Censo de Vida Marina, realizados a la orilla de las playas en la Ensenada Guayaquil y Bahía Chile, al oeste y este de la Punta Fort William, respectivamente. También los microbiólogos pueden utilizar los mapas para encontrar respuestas en la zonificación de asentamiento de micro-alga sobre la nieve tanto roja como verde.

Por otro lado, los geólogos y glaciólogos, utilizan el DEM en el programa Evolución del paisaje de Fort William en respuesta al tectonismo, al nivel del mar y al retiro de glaciares, cuyo objetivo es establecer los períodos de formación de los Cordones Litorales (Hussin, et al. 2009), lo cual permitirían visualizar el comportamiento de los cordones litorales generados en sistemáticamente a lo largo de varios periodos geológicos, midiendo sus dimensiones y demarcaciones, tanto en la variación del nivel de mar como el retiro o crecimiento de los glaciares.

Así también, la utilización del DEM en el Estudio y Modelamiento del ruido en Punta Fort William (Chavarría, Salazar, 2009) que tenía como entender el comportamiento del ruido en la Punta Fort William en el área de influencia de la Estación Maldonado.

Otra aplicación del DEM es el Estudio de la evolución multitemporal de los glaciares de la Isla Greenwich-Antártida (Icaza, Burbano y Salazar, 2009), con el objetivo de entender el rol de la Antártida y en general de las zonas polares en el levantamiento del nivel del mar permitirá elaborar los escenarios futuros sobre su desenvolvimiento y adoptar las medidas de adaptación para conservar los ambientes, recursos y reducir los impactos en los grupos de interés que conviven con aquellos.

Esta interacción entre los investigadores y los mapas resultantes permite el enriquecimiento significativo del MaldonadoGIS, ya que contribuirá al crecimiento de una base de datos espacial, cuyo desarrollo de esta siguiente etapa se recomienda para una futura versión del este GIS. Este repositorio permitirá que variables de otros estudios puedan ser analizadas y modeladas por diversos científicos encontrando respuestas difíciles de encontrar cuando la zona de estudio es un sólo ecosistema-laboratorio.

Otra posible extensión del MaldonadoGIS es colocar la información espacial generada a una plataforma Web o GISWeb que permita a los usuarios acceder dinámicamente a través de diferentes dispositivos móviles, GPS explorador, tablets y Smartphone.

Entre las instituciones interesadas en la información generada en esta investigación y futuras trabajos se encuentran el Instituto Antártico Ecuatoriano - INAE, Instituto

Oceanográfico de la Armada – INOCAR, SENESCYT e instituciones de educación superior estatales y privadas, como entes que deberían interactuar para fortalecer, fomentar, gestionar y desarrollar la investigación antártica en este caso específico con la generación de nueva información que se agregarían a una base espacial antártica. Asimismo, las instituciones de nivel primario y secundario como usuarios de información didáctica, que ayudaría a motivar e inspirar a futuros investigadores antárticos.

8. Bibliografía

- Burbano L., Icaza P., Salazar D. 2008. Estudio de la Evolución Multitemporal de los glaciares de la Isla Greenwich – Islas Shetland del Sur - Península Antártica. No publicado.
- Chang K. T. 2008. Introduction to Geographic Information Systems. McGraw-Hill International Edition, Fourth Edition.
- Horn N., Arellano H. 1990. El Sitio de instalación de la Estación Científica Ecuatoriana en la Antártida. Acta Antártica Ecuatoriana, (2) 91-98. 1990
- Icaza P. y Burbano L. 2007. Monitoreo de glaciares, Isla Greenwich – Antártida. Ecuador Antártico, año 2 N° 3, 14-15.
- Moreano H. 1989. Alternativas de Ubicación de la Primera Estación Científica Ecuatoriana en la Antártida. Acta Antártica Ecuatoriana, (1) 131-136.
- Olea R. 1999. GEOSTATISTICS FOR ENGINEERS AND EARTH SCIENTISTS, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data.
- Ripley, B.D. 1970. Spatial Statistics. Series in Probability Mathematical Statistics.
- Shary, P. 2008. Models of Topography, Springer eBook. Springer Berlin Heidelberg.
- Urbina G., Arciniegas S., Ruano M. 1990. Trabajos Geodésicos realizados durante la II Expedición Ecuatoriana hacia la Antártida en Punta Fort Williams – Isla Greenwich. Acta Antártica Ecuatoriana, (2) 79 – 8.
- Wolfgang V. 1946. Sudamérica los llamaba. Editorial Nuevo Mundo, 5 R. L., de México D.
- Bindschadler R. 2007. The Landsat Image Mosaic of Antarctica. Journal Remote Sensing of Environment.

Chepelev, O. A. 2010. La construcción de un hidrológicamente corregir DEM Kriging (por el ejemplo. Baraboy región de Odessa.) / O. Chepelev, AI Nechipurenko // Gestión de tierras, catastro y la vigilancia terrestre. -2010. - № 11. - S. 101-108.

INAE, 2008. Actividades del Ecuador en la Antártida Plan 2008-2009. Intercambio de información conforme a los Artículos III (1) y VII (5) del Tratado Antártico.