Universidad de Cádiz

# DETERMINACIÓN DEL NIVEL MEDIO DEL MAR EN EL MAR DE BRANSFIELD Y APLICACIÓN A LA DETERMINACIÓN DEL GEOIDE EN ISLAS DECEPCIÓN Y LIVINGSTON, ISLAS SHETLAND DEL SUR (ANTÁRTIDA).

**TESIS DOCTORAL**


Autor: ***Bismarck Jigena Antelo***

Directores: ***Manuel Berrocoso Domínguez***
***Juan Manuel Vidal Pérez***


Julio de 2015

Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía
Departamento de Matemáticas

# Determinación del nivel medio del mar en el Mar de Bransfield y aplicación a la determinación del geoide en Islas Decepción y Livingston, Islas Shetland del Sur (Antártida).

**TESIS DOCTORAL**

*Bismarck Jigena Antelo*

Directores: *Manuel Berrocoso Domínguez*

*Juan Manuel Vidal Pérez*

Julio de 2015

Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía
Departamento de Matemáticas

# Determinación del nivel medio del mar en el Mar de Bransfield y aplicación a la determinación del geoide en Islas Decepción y Livingston, Islas Shetland del Sur (Antártida).

*Memoria presentada por*

***Bismarck Jigena Antelo***

*para optar al Título de Doctor en Ciencias*

*Dirigida por los Doctores*

***Dr. Manuel Berrocoso Domínguez***

***Dr. Juan Manuel Vidal Pérez***

Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía
Departamento de Matemáticas
Facultad de Ciencias
Universidad de Cádiz

Julio de 2015

Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía
Departamento de Matemáticas

D. MANUEL BERROCOSO DOMINGUEZ, Profesor Titular de Universidad del Departamento de Matemáticas y D. JUAN MANUEL VIDAL PEREZ, Profesor Ayudante Doctor del Departamento de Construcciones Navales, de la Universidad de Cádiz,

HACEN CONSTAR:

Que el trabajo recogido en la presente Memoria de Tesis Doctoral, titulada "Determinación del Nivel Medio del Mar en el mar de Bransfield y aplicación a la determinación del geoide en islas Decepción y Livingston, Islas Shetland del Sur (Antártida)", presentada por el Ingeniero en Organización Industrial y Licenciado en Náutica y Transporte Marítimo D. Bismarck Jigena Antelo ha sido realizado bajo nuestra dirección. Considerando que resume su trabajo de Tesis Doctoral y que reúne todos los requisitos legales, autorizamos su presentación y defensa para optar al grado de Doctor en Ciencias por la Universidad de Cádiz.

Para que así conste a los efectos oportunos firmamos la presente en Puerto Real, a 03 de Julio de 2015.

Fdo. Dr. D. Manuel Berrocoso Domínguez

Fdo. Dr. D. Juan Manuel Vidal Pérez

Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía
Departamento de Matemáticas

D. MANUEL BERROCOSO DOMÍNGUEZ, Profesor Titular de Universidad del Departamento de Matemáticas y D. JUAN MANUEL VIDAL PÉREZ, Profesor Ayudante Doctor del Departamento de Construcciones Navales, de la Universidad de Cádiz,

HACEN CONSTAR:

Que el trabajo recogido en la presente Memoria de Tesis Doctoral, titulada "Determinación del Nivel Medio del Mar en el mar de Bransfield y aplicación a la determinación del geoide en islas Decepción y Livingston, Islas Shetland del Sur (Antártida)", presentada por el Ingeniero en Organización Industrial y Licenciado en Náutica y Transporte Marítimo D. Bismarck Jigena Antelo ha sido realizado bajo nuestra dirección. Considerando que resume su trabajo de Tesis Doctoral y que reúne todos los requisitos legales, autorizamos su presentación y defensa para optar al grado de Doctor en Ciencias por la Universidad de Cádiz.

Para que así conste a los efectos oportunos firmamos la presente en Puerto Real, a 03 de Julio de 2015.

Fdo. Dr. D. Manuel Berrocoso Domínguez  Fdo. Dr. D. Juan M. Vidal Pérez

Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía
Departamento de Matemáticas

La presente Tesis ha sido posible a la financiación de los siguientes instituciones y proyectos:

- Agencia Española de Cooperación Internacional y Desarrollo (AECID), que financió la estancia del doctorando durante el curso 2007-2008.
- Universidad de Cádiz, a través del Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía, que apoyo la investigación mediante becas y contratos de investigación durante los cursos 2008-2009 y 2009-2010 y desde octubre del 2010 como Profesor Sustituto Interino en los Departamentos de Física Aplicada y Ciencias y Técnicas de la Navegación.
- Proyectos de investigación dependientes del Ministerio Español de Ciencia e Innovación, a través del programa de Investigación Antártica y recursos naturales:
  - ESTUDIOS GEODÉSICOS EN LA ISLA DECEPCIÓN: MODELOS DE DEFORMACIÓN, DETERMINANCIÓN DEL GEOIDE Y SISTEMA DE INFORMACIÓN MULTIDISCIPLINAR DE APOYO CIENTÍFICO (GEODEC-GEODESIA). Ref: REN2000-0551-C03-01/ANT
    Entidad financiadora: Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT)
    Duración, desde: Enero-2001 hasta: Diciembre-2003
  - ADQUISICIÓN DE UN SOFTWARE CIENTÍFICO PARA TRATAMIENTO DE DATOS GPS.
    Entidad financiadora: Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT)
    Duración, desde: Junio-2001 hasta: Junio-2003
  - OBSERVACIONES GEODÉSICAS Y GEOFÍSICAS EN EL CONTINENTE ANTÁRTICO Y EN LAS ISLAS DECEPCIÓN Y LIVINGSTON (OBGECON). Referencia: REN2002-10767-E ANT
    Entidad financiadora: Ministerio de Ciencia y Tecnología
    Duración, desde: Mayo-2003 hasta: Mayo-2004
  - OBSERVACIONES GEODÉSICAS EN LA ISLA DECEPCIÓN DURANTE LA CAMPAÑA ANTÁRTICA ESPAÑOLA 2004-2005
    Entidad financiadora: Universidad de Cádiz
    Duración, desde: Diciembre-2004 hasta: Abril-2005
  - CONTROL GEODÉSICO DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DE LA ISLA DECEPCIÓN (CONGEODEC). Referencia: CGL2004-21547-E
    Entidad financiadora: Ministerio de Ciencia y Tecnología
    Duración, desde: Enero-2005 hasta: Enero-2006

- INVESTIGACIONES GEODÉSICAS, GEOFÍSICAS Y DE TELEDETECCIÓN EN LA ISLA DECEPCIÓN Y SU ENTORNO (PENÍNSULA ANTÁRTICA, ISLAS SHETLAND DEL SUR), (VOLTEDEC-GEO2), Ref: CGL2005-07589-C03-01/ANT
  Entidad financiadora: Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT)
  Duración, desde: Octubre-2005 hasta: Octubre-2008
- SEGUIMIENTO DE LA ACTIVIDAD VOLCANICA DE LA ISLA DECEPCION (ANTÁRTIDA), GEODESIA (SEGAVDEC-GEODESIA). Ref: CGL2007-28768-E/ANT
  Entidad financiadora: Ministerio de Ciencia e Innovación
  Duración, desde: Mayo-2008 hasta: Mayo-2009
- CONTINUIDAD Y ANALISIS DE SERIES TEMPORALES GEODESICAS EN LA ANTÁRTIDA (SERTEMANT-GEODESIA). Referencia: CTM2008-03113-E/ANT
  Entidad financiadora: Ministerio de Ciencia e Innovación
  Duración, desde: Mayo-2009 hasta: Mayo-2010
- INVESTIGACIONES GEODÉSICAS Y GEOTÉRMICAS, ANÁLISIS DE SERIES TEMPORALES E INNOVACIÓN VOLCÁNICA EN LA ANTÁRTIDA (ISLAS SHETLAND DEL SUR Y PENÍNSULA ANTÁRTICA) (GEOTINANT). Referencia: CTM2009-07251/ANT
  Entidad financiadora: Ministerio de Ciencia e Innovación
  Duración, desde: 1-Enero-2010 hasta: 31-Diciembre-2012

El trabajo de investigación ha sido llevado a cabo en el Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía, adscrito al Departamento de Matemáticas en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Cádiz, siendo el doctorando parte del Grupo de Investigación RNM-314 Geodesia y Geofísica Cádiz.

Los datos geodésicos, gravimétricos, oceanográficos y meteorológicos han sido tomados en las islas Livingston y Decepción, islas Shetland del Sur (Antártida), a partir de la campaña antártica española 2001-2002 hasta la campaña 2012-13. El autor y los directores de esta Tesis Doctoral han participado como investigadores antárticos en diferentes campañas antárticas entre el 2001 y 2013.

Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía
Departamento de Matemáticas

# *Dedicatoria*

*A mi esposa Sandra Jacqueline y a mis hijos Bismarck Jr. y María del Mar, con todo mi amor, cariño y agradecimiento, pues gran parte del tiempo invertido en esta Tesis, era el tiempo que debía ser dedicado a ellos. Es también vuestra Tesis.*

*A mis padres Bárbara y Miguel, en el oriente eterno, y estoy seguro que donde se encuentren también estarán orgullosos de este logro y de este momento…*

Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía
Departamento de Matemáticas

# *Agradecimientos*

Siempre se ha pensado y se ha dicho que: *Una Tesis Doctoral es un trabajo muy solitario…* en mi caso, después de todo el tiempo transcurrido y el camino recorrido llego al grato convencimiento de que en esta etapa profesional no he estado solo, he conocido a muchas personas, en la mayoría de los casos, gente maravillosa que me dieron su confianza, que me han tendido la mano, me han apoyado y han estado conmigo cuando los he necesitado. ¡Gracias queridos amigos!

En primer lugar, mi agradecimiento a mi familia, Sandra, Junior y Mar, sin vuestra, comprensión, tolerancia y sobretodo vuestro apoyo y cariño, todo esfuerzo hubiera sido inútil y esta empresa no habría sido posible.

Mi reconocimiento y agradecimiento a mis directores de tesis, los doctores Manolo Berrocoso y Juan Vidal, excelentes profesionales, pero mejores personas y sobretodo muy buenos amigos. Juan muchas gracias por tu apoyo y el empujón final con tesis y artículos. Manolo gracias por todo, tu amistad durante más de 20 años, tu apoyo en mi tesis, en mi cambio de residencia y con mi familia… con todo lo que hemos pasado la tesis también ha sido un proyecto de vida.

A mis compañeros del Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía, *miembros natos y adscritos,* por su ayuda y comprensión en los buenos y malos momentos que pasamos y estoy seguro seguiremos pasando, Amos, Enrique, Jorge, Raúl, Nacho, Mirenchu, Alejandro, Alberto, Juan Antonio, Eva, María José, Gonzalo, Luismi, Raquel, Belén y Marta. Muchas gracias por todo.

A mis *compis* de la cervecita y los cafés, María Jesús, María Ángeles, Josemari, Miguel Ángel, Domingo, Manolo, Amos y Nacho, por su buenos consejos y comentarios. Estoy seguro que seguiremos disfrutando de esa buena costumbre y de la buena amistad.

A José Ángel, Francisco Antonio, Jesús, Chema, gracias por vuestra ayuda, consejos y por compartir amistad, cafés y buena charla.

A Alicia García del Museo de Ciencias Naturales del CSIC, por tomarme en cuenta en algunos de sus proyectos, hacerme participar y compartir su gran experiencia científica y por estar siempre dando ánimos a los que tuvimos la suerte de trabajar contigo.

A la Universidad de Cádiz por darme la oportunidad de ser miembro de la UCA y compartir experiencias con profesores, administrativos y alumnos en los diferentes Centros y Departamentos con los cuales he tenido relación docente e investigadora durante este tiempo, entre ellos, La Facultad de Ciencias y el Departamento de Matemáticas, La Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales y el Departamento de Física Aplicada, La Escuela de Ingenierías Náutica y del Transporte Marítimo, Marina y Radioelectrónica y el Departamento de Ciencias y Técnicas de la Navegación y la Escuela Politécnica Superior de Algeciras. Desde el sitial de PSI, estamos cumpliendo con todo para continuar y esperamos poder seguir aportando, lo poco o mucho que tengamos, en beneficio de esta gran Institución.

Al Real Observatorio de la Armada y del Instituto Hidrográfico de la Marina, por ser las instituciones donde inicie mi etapa académica en España y por tener siempre sus puertas abiertas y prestarme el apoyo técnico, científico y personal cuando acudí a ellos.

En todo este camino, es imposible nombrar a todas las personas, así que este párrafo va dedicado a todas las personas y amigos que me han mostrado su apoyo y han compartido buenos y malos momentos en esta etapa de mi vida. Muchas gracias a todas y todos, porque de una u otra manera me han ayudado y han hecho que mi vida y la de mi familia haya sido más agradable.

Esta tesis ha sido realizada con mucho esmero y esfuerzo y hemos podido cumplir el objetivo gracias a todos ustedes.

***¡Muchas gracias a todos y por todo!***

*Haz lo que puedas, con lo que tengas, en donde estés… Pero siempre, llévanos a la gloria…*

Lema templario

# Índice

**CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN** 1

1.1 Resumen. 1
1.2 Planteamiento del problema 4
1.3 Objetivos de la Tesis. 4
1.4 Justificación. 5
1.5 Delimitación y alcance. 6
1.6 Estructura de la Memoria 6

**CAPITULO 2. ANTECEDENTES Y GENERALIDADES SOBRE EL ÁREA DE ESTUDIO.** 9

2.1 Descripción general del área de estudio. 9
2.2 Marco geológico y tectónico 12
2.3 Marco geodésico y gravimétrico 17
2.3.1 *Red Geodésica de la Antártida Española (RGAE)* 18
*2.3.2 Red Geodésica de isla Decepción (REGID).* 19
2.3.3 *Red de Nivelación de isla Decepción (RENID).* 22
2.3.4 *Red Gravimétrica de isla Decepción (REGRID).* 25
*2.3.5 Establecimiento de puntos gravimétricos auxiliares de la red REGRID.* 26
2.4 Marco oceanográfico. 28
*2.4.1 Estaciones mareográficas.* 28
*2.4.2 Puntos de control de mareógrafos (TGBM) y puntos auxiliares de referencia de mareógrafos (TGAR).* 28

**CAPITULO 3. DETERMINACIÓN DEL NIVEL MEDIO DEL MAR** 31

3.1 Antecedentes de trabajos en la zona 31
3.2 Instrumentos, datos y metodología 34
*3.2.1 Equipos utilizados para adquisición de datos de marea* 34
*3.2.2 Fondeo de sensores de presión* 35
*3.2.3 Georreferenciación y determinación de cota altimétrica en las estaciones.* 36
3.3 Determinación de las constituyentes de marea. 38
3.4 Resultados y discusión sobre la determinación de las constituyentes de marea. 41
3.5 Determinación del nivel medio del mar en las islas Decepción y Livingston. 45
3.6 Resultados y discusión sobre la determinación del nivel medio del mar (NMM) 45

**CAPITULO 4. DETERMINACION DEL GEOIDE DE PRECISIÓN EN ISLAS DECEPCIÓN Y LIVINGSTON (ANTÁRTIDA).** 49

4.1. Antecedentes de trabajos en la zona. 49
4.2. Modelos globales válidos en la zona de interés. 52
4.2.1 *Modelo EGM96* 52
4.2.2 *Modelo EGM2008* 53
4.2.3 *Modelo GGM03* 54
*4.2.4 Modelo ITSG-Grace2014s* 55
4.3. Metodología para el cálculo del geoide. 56
4.4. Equipamiento, adquisición y procesamiento de datos 62
4.5. Medidas realizadas en isla Livingston 65
4.6. Resultados determinación del geoide 66
4.7. Discusión sobre GeoiDEC2014 67

**CAPITULO 5. RESULTADOS** 75

5.1 Publicaciones Científicas. 77

Vidal J., Berrocoso M., Jigena B. ***Hydrodynamic modeling of Port Foster, Deception Island (Antarctica).*** In: Book Nonlinear and Complex Dynamics. Chapter 16, pp 193-206. 2011. ( Publicado). 77

*Jigena B., Vidal J., Berrocoso M.,* ***Determination of the mean sea level at Deception and Livingston islands, Antarctica.*** Antarctic Science, pp 1-2, 2014. ( Publicado). 86

Jigena B., Vidal J., Berrocoso M., ***Determination of the tide constituents at Livingston and Deception Islands (South Shetland Islands, Antarctica), using annual time series.*** DYNA 82 (191), pp. 209-218. June, 2015. (Publicado). 90

*Jigena B., Berrocoso M., Torrecillas C., Vidal J., Barbero I. and Fernández-Ros A.,* ***Determination of an experimental geoid at Deception and Livingston Islands (South Shetland Islands, Antarctica).*** Antarctic Science (Enviado, In Press). 101

5.2 Participación en Congresos internacionales 119

XXXIII SCAR Biennial Meetings and Open Science Conference, Auckland, New Zealand from 23 August – 3 September, 2014. 119

*Berrocoso M. , Jigena B., Vidal J., and Prates G.* ***Tidal Gauge Stations at Deception and Livingston Islands (South Shetland Islands, Antarctica), 2007-2014: Determination of the mean sea level and tide constituents, using a long term time series.*** *Poster*

26th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG, Prague, Czech Republic, from the 22nd of June to the 2nd of July 2015. 121

*Berrocoso M., Jigena B., Vidal J., Prates G., Gárate J.* ***Establishment of the mean sea level at Deception and Livingston Islands (Antarctica) and application in the determination of a precise local geoid.*** *Poster*

**CAPITULO 6. CONCLUSIONES.** 123

6.1. Conclusiones 123

**BIBLIOGRAFÍA** 127

**LISTADO DE ACRONIMOS** 137

## *ANEXOS*

**Anexo A: RESEÑAS DE VERTICES Y MARCAS GEODESICAS**
**Anexo B: NIVELACIÓN GEOMETRICA**
**Anexo C: NIVELACIÓN TRIGONOMETRICA Y ENLACES**
**Anexo D: GRAVIMETRIA**

# Índice de Figuras


| | | |
|---|---|---|
| Figura 1.1: | Estructura de la Tesis Doctoral | 7 |
| Figura 2.1: | Area de estudio y ubicación de estaciones | 9 |
| Figura 2.2. | Topografía de isla Decepción | 10 |
| Figura 2.3: | Toponimia de isla Decepción | 10 |
| Figura 2.4: | Mapa topográfico de isla Decepción (1829) | 11 |
| Figura 2.5: | Isla Livingston y sus principales referencias | 12 |
| Figura 2.6: | Marco tectónico regional y ubicación edificios volcánicos | 13 |
| Figure 2.7: | Mapa de elementos geológicos y vulcanológicos en isla Decepción. | 17 |
| Figura 2.8: | Red RGAE, vértices geodésicos. | 18 |
| Figura 2.9: | Red geodésica REGID | 19 |
| Figura 2.10: | Estructura de los vértices geodésicos de la Red REGID | 21 |
| Figura 2.11: | Red de Nivelación de Isla Decepción , RENID | 22 |
| Figura 2.12: | Enlaces entre las líneas de nivelación de la red RENID | 24 |
| Figura 2.13: | Red RENID, marcas de nivelación empotradas sobre roca volcánica | 25 |
| Figura 2.14: | Red gravimétrica REGRID | 27 |
| Figura 2.15: | Ubicación de TGBM y TGAR (DECMAR, LIVMAR) | 29 |
| Figura 3.1: | Sistema de fondeo y anclaje del mareógrafo la costa | 35 |
| Figura 3.2: | Fondeo del sensor de presión principal (PTG) | 35 |
| Figura 3.3: | Diagrama de enlaces de nivelación en las estaciones mareográficas | 36 |
| Figura 3.4: | Ajuste lineal de medidas instantáneas del NMM | 37 |
| Figura 3.5: | Referenciación altimétrica de las medidas de marea. | 38 |
| Figura 3.6: | Series de marea obtenidas en LIVMAR y DECMAR | 39 |
| Figura 3.7: | Serie de presión atmosférica en LIVMAR. | 39 |
| Figura 3.8: | Amplitud de las principales constituyentes de marea | 41 |
| Figura 3.9: | Desfase de las principales constituyentes de marea | 42 |
| Figura 3.10: | Serie mensual de marea en LIVMAR y DECMAR | 44 |
| Figura 4.1: | Mapa geoidal de la Antártida 1990. | 49 |
| Figura 4.2: | Mapa de anomalías de Bouguer en isla Decepción y su entorno | 50 |
| Figura 4.3: | Geoide Experimental 2007 para isla Decepción | 51 |
| Figura 4.4: | Modelo geopotencial EGM 96, valores de N | 52 |
| Figura 4.5: | Modelo geopotencial EGM 2008, valores de N. | 53 |
| Figura 4.6: | Modelo GGM03, valores de anomalías de la gravedad | 54 |

Figura 4.7: Modelo ITSG-Grace2014, valores de anomalías de la gravedad 55
Figura 4.8: Valores de N (metros) de los diferente modelos globales utilizados 56
Figura 4.9. Relación entre el geoide, elipsoide y la superficie topográfica terrestre. 57
Figura 4.10. Gravedad media a lo largo de la línea de la plomada 59
Figura 4.11. Geoide experimental de precisión de isla Decepción, GeoiDEC14 67
Figura 4.12: Errores obtenidos en la determinación de GeoiDEC14 68
Figura 4.13: Valores de N obtenidos para geoides globales 71

# Índice de Tablas


| | | |
|---|---|---|
| Tabla 2.1: | Estaciones red REGID. | 21 |
| Tabla 2.2: | Puntos de la red RENID | 23 |
| Tabla 2.3: | Enlaces entre líneas de nivelación de la red RENID. | 23 |
| Tabla 2.4 : | Red gravimétrica REGRID. | 25 |
| Tabla 2.5: | Red REGRID, puntos gravimétricos auxiliares | 27 |
| Tabla 2.6: | Estaciones mareográficas y sus TGBM y TGAR. | 28 |
| Tabla 3.1: | Constantes Armónicas, segun Dragani et al. 2004 | 32 |
| Tabla 3.2: | Valores medios anuales de presión atmosférica | 40 |
| Tabla 3.3: | Principales constituyentes de marea en DECMAR y LIVMAR. | 43 |
| Tabla 3.4: | Resultados del ajuste lineal en DECMAR y LIVMAR | 46 |
| Tabla 3.5: | Valores obtenidos para la determinación NMM | 47 |
| Tabla 4.1: | Valores de la ondulación del geoide para GeoiDEC14 | 66 |
| Tabla 4.2 : | GeoiDEC14, errores estimados agrupados por zonas | 69 |
| Tabla 4.3 : | Valores experimentales de N obtenido para isla Livingston | 69 |
| Tabla 4.4 : | Resumen estadístico de los valores de N (m) entre modelos globales | 72 |

## Capítulo 1

# Introducción

### 1.1. Resumen

Las Islas Shetland del Sur al ser parte de la Antártida, es una zona geográfica extrema y con un entorno muy complejo para realizar levantamientos de campo y toma de datos en el terreno; por esta razón, las observaciones "in situ" de datos geodésicos, geofísicos, oceanográficos y específicamente los datos de marea son escasos, y en general los datos disponibles son series temporales muy cortas que normalmente corresponden a algunos días del verano austral (noviembre a marzo). Los datos de marea obtenidos por métodos directos y con series temporales de más de un año, constituyen una fuente muy valiosa de información para diferentes aplicaciones de ciencias e ingeniería, que hacen uso del nivel medio del mar como plano de referencia vertical. El nivel medio del mar (NMM) es el plano de referencia vertical fundamental, de obligada utilización en aplicaciones geodésicas, geofísicas y oceanográficas, tanto técnicas como científicas. Para su obtención y determinación es necesario un estudio de marea completo y detallado.

Las primeras observaciones de marea en la isla Decepción fueron realizadas en 1970 por el Servicio de Hidrografía Naval de la República Argentina (SHN 1970); pero, desde 1988 grupos de investigación de España y Argentina han estado realizando observaciones en las islas Livingston y Decepción. En isla Livingston se encuentra situada la Base Antártica Española “Juan Carlos I”. En esta isla se han realizado observaciones geodésicas, geofísicas y oceanográficas. En isla Decepción, se encuentra la Base Antártica Española “Gabriel de Castilla”. Esta isla es de gran importancia para nuestro estudio, puesto que se trata de un volcán cuaternario activo y es una de las zonas volcánicas activas de la Antártida, donde además de las observaciones que se realizan en isla Livingston, se llevan a cabo actividades de vigilancia de la actividad volcánica y tectónica de la isla, utilizando técnicas de geodesia, geofísica, oceanografía, termometría, teledetección y sistemas de información geográfica, detectando dos crisis volcánicas entre diciembre de 1990 y enero de 1991 y posteriormente entre enero y febrero de 1999 (Berrocoso et al. 2005, 2006a, 2006b, 2006c, 2007, 2008, 2012, Vidal et al. 2011, 2012, Jigena et al. 2014).

En esta tesis uno de los objetivos principales ha sido la adquisición, estudio y tratamiento de datos de marea de al menos un año de duración, siendo el resultado de este trabajo el análisis de la marea en una zona antártica utilizando series de datos a largo período. Para cumplir con este objetivo, se presenta un estudio detallado de las constituyentes de marea en las islas

Livingston y Decepción (Antártida), y a partir del mismo, establecer un valor preciso del nivel medio del mar en las islas.

Con este objetivo, en el año 2007 se instalaron las primeras estaciones de marea en las islas Livingston y Decepción, denominadas LIVMAR y DECMAR, respectivamente. En cada una de las estaciones se obtuvieron registros de marea de más de dos años de duración. Los datos fueron obtenidos mediante sensores de presión modelo Aqualogger TP520, además de otros sensores modelo TD304 SAIV fondeados como mareógrafos de control. Además del valor de la presión, los sensores obtuvieron datos adicionales de temperatura y salinidad del agua de mar. Los sensores se instalaron muy cerca de la costa pero a una profundidad suficiente, y siempre superior a los 4 metros, de manera que no estuviesen afectados por el hielo marino que se forma entre los meses de abril a diciembre, y para minimizar los errores de georreferenciación con respecto a las marcas geodésicas de control altimétrico de mareas, que se encuentran en tierra. También, se obtuvieron datos adicionales de presión atmosférica y dirección y velocidad del viento simultáneamente con los registros de marea. Estos datos fueron utilizados para la corrección de la marea por efectos meteorológicos, y realizar posteriormente una correlación del nivel del mar con las variables meteorológicas y oceanográficas. Para la obtención de estos datos se han utilizado las estaciones meteorológicas establecidas por al AEmet (Agencia Estatal de Meteorología) instaladas en las islas Livingston y Decepción.

Un problema muy importante en los trabajos de marea realizados anteriormente en la zona, es la falta de registros de marea referenciados altimétricamente a puntos de referencia vertical permanentes. Por esta razón, uno de los primeros trabajos de campo fue la monumentación de los puntos geodésicos en tierra para el control de los mareógrafos (TGBM) y de las marcas auxiliares de referencia de nivel (TGAR). Los TGBM y TGAR han sido utilizados para la referenciación de los datos de marea, como puntos principales de referencia en tierra y están vinculados a los vértices geodésicos GPS de la red RGAE (Red Geodésica Antártica Española) o a la red REGID (REd Geodésica de Isla Decepción) y a partir de estos a la redes RENID (REd de Nivelación de Isla Decepción) y REGRID (REd GRavimétrica de Isla Decepción). Los TGBM y TGAR quedaron establecidos como datums o marcas geodésicas de referencia fundamentales, tanto para la referencia vertical como horizontal de las estaciones mareográficas y además han sido las referencias altimétricas fundamentales para la determinación del nivel medio del mar en la zona.

Uno de los objetivos principales de esta Tesis Doctoral ha sido la adquisición, estudio y tratamiento de datos de marea de al menos un año de duración, a fin de presentar un estudio detallado de las constituyentes de marea en las islas Livingston y Decepción (Antártida), y a partir del mismo, establecer un valor preciso del nivel medio del mar en estas islas y su entorno en el mar de Bransfield. Los cálculos de las constantes armónicas se realizaron a partir de series obtenidas, contando con 798 días de observación con datos tomados en frecuencia horaria. Para obtener las amplitudes y retardos de fase de las componentes de marea más representativas o de

mayor energía, se aplicó el método de análisis armónico por mínimos cuadrados (Foreman 1977). Los resultados mejoran trabajos previos en la región, habiéndose obtenido 70 constituyentes de marea en ambas estaciones, de las cuales las 19 primeras son las más representativas, con amplitudes superiores a 1 cm y con un aporte del 93% de la energía total de la onda. En ambas estaciones se confirma que la marea tiene un régimen mixto de comportamiento semidiurno.

Una vez determinado el nivel medio del mar en cada una de las estaciones, a partir de este nuevo dato, se obtuvieron las alturas ortométricas que fueron calculadas utilizando la altura elipsoidal, adquirida directamente mediante observaciones GPS, y de las diferencias de nivel obtenidas por nivelación geométrica y corregida por medidas de gravedad. Con las alturas ortométricas obtenidas, se corrigieron y actualizaron los valores de las coordenadas geodésicas en los vértices y marcas geodésicas de las redes utilizadas, obteniendo valores más precisos y referidos al nivel medio del mar (MSL) calculado en este trabajo. Con este nuevo marco de referencia geodésico, hemos calculado y determinado un modelo local de geoide de precisión para Isla Decepción denominado GeoiDEC14, utilizando la metodología GPS/nivelación/gravimetría y cuyo resultado muestra una mejora en precisión respecto a los modelos globales y al modelo experimental obtenido el 2007.

Para comprobar la validez de nuestro modelo, hemos realizado una comparación del GeoiDEC14 frente a los modelos globales vigentes y con cobertura en nuestra área de estudio, tales como los modelos EGM96, EGM2008, GRACE03 y GRACE2014. Los resultados de la comparación siempre muestran valores negativos, puesto que el valor promedio es de 18,8 m para nuestro modelo GeoiDEC14, frente a los valores promedio de entre 19,8 a 20,6 m para los modelos globales. Esta diferencia se debe principalmente a la poca resolución de los modelos globales y en menor medida al cambio de densidad en la corteza terrestre en isla Decepción, debido a la actividad volcánica que podría estar vinculada a la presencia de anomalías de la gravedad que influyen en la definición del geoide. Es destacable que las anomalías de N detectadas en el GeoiDEC14, coincidan con los puntos calientes de la isla, puesto que los valores mínimos encajan en Bahía Fumarolas y Bahía Balleneros, mientras que los valores máximos se encuentran próximos Punta Colatinas, Glaciar Negro y Punta Murature.

También se han determinado tres puntos dotados con ondulación del geoide (N) y coordenadas geodésicas en isla Livingston, que dada su poca cantidad y mala distribución geográfica de los puntos, no permiten la determinación de un geoide en esta isla, pero nos sirven para comprobar la bondad de los resultados obtenidos en isla Decepción, presentando estos valores experimentales un promedio de 18.9 metros, muy similar al promedio obtenido con el GeoiDEC14 para isla Decepción y que además nos reafirman la falta de detalle en los modelos de geoide globales en la zona.

Es importante hacer notar la gran importancia de nuestro trabajo para aplicaciones geodésicas, oceanográficas e hidrográficas, además de otras, como estudios de variaciones del

nivel medio del mar, calentamiento global y aplicaciones ambientales. Combinar la superficie de nivel medio del mar y un geoide local de precisión nos puede proporcionar resultados muy interesantes para el estudio y análisis de la dinámica volcánica, además de ser una herramienta muy valiosa de apoyo en aplicaciones de oceanografía y geofísica y otras ciencias y técnicas que utilicen el nivel medio del mar como sistema de referencia vertical.

La utilización de estos resultados por la comunidad científica permitirá contar con una base de datos referida al mismo plano de referencia, actualizada y precisa, y contribuirá a mejorar los resultados de los diferentes estudios y modelos regionales de la zona que puedan hacer uso de esta información.

## 1.2. Planteamiento del problema

El área sub-antártica del Estrecho de Bransfield y particularmente las islas Decepción y Livingston, en los últimos años ha tenido un desarrollo notable de la investigación científica, que ha llevado a cabo la realización de diferentes proyectos, tanto científicos como técnicos. En la mayoría de trabajos la referenciación de los puntos se ha efectuado de forma relativa en la parte altimétrica, notándose que entre los diferentes niveles de referencia vertical utilizados existen diferencias que hacen muy difícil relacionar estos trabajos a un mismo plano. Hasta la fecha, la Antártida no cuenta con un plano de referencia vertical estandarizado al cuál se puedan relacionar las diferentes medidas altimétricas con una buena precisión y fiabilidad.

Esta Tesis Doctoral, nace de la necesidad de definir el nivel medio del mar como nivel de referencia vertical y partir de este *datum* altimétrico, actualizar los datos geodésicos y geofísicos existentes, datos GPS-GNSS, de nivelación y gravimétricos, tomados desde el año 2001, a fin de obtener un modelo de geoide local de precisión en el área de las islas Livingston y Decepción, que pueda ser utilizado como superficie de referencia vertical, cumpliendo con los estándares de precisión y fiabilidad, para ser utilizado en diferentes aplicaciones, tanto técnicas como científicas, que requieran de un sistema de referencia para la georreferenciación de sus trabajos.

## 1.3. Objetivos de la Tesis

Para el desarrollo de este trabajo de investigación hemos planteado los siguientes objetivos

### *1.3.1. Objetivo general*

Determinar el nivel medio del mar en el área de las islas Decepción y Livingston, archipiélago de las islas Shetland del Sur (Antártida), para actualizar los datos geodésicos, altimétricos y gravimétricos de las redes geodésicas establecidas en la Antártida, y con estos nuevos datos, obtener un modelo de geoide local de precisión que pueda utilizarse en esta área con fiabilidad dentro de los estándares internacionales de precisión actualmente vigentes, y que además, podamos extrapolar estos resultados al área del estrecho de Bransfield combinado los valores obtenidos con los que proporcionan los modelos globales vigentes en esta área.

### *1.3.2. Objetivos Específicos*

Para el cumplimiento del objetivo general, los objetivos específicos a cumplir son los siguientes:

- Realizar un diagnóstico y análisis de los datos GNSS-GPS, datos de marea, datos de nivelación y datos gravimétricos, tomados en diferentes campañas antárticas.
- Establecimiento de las estaciones mareográficas en las islas Livingston y Decepción.
- Monumentación y georreferenciación de las marcas geodésicas para control de referencia de mareógrafos (TGBM) y de las marcas auxiliares de referencia de los mareógrafos (TGAR).
- Establecer las coordenadas geodésicas (latitud, longitud, altura elipsoidal, altura ortométrica) de los TGBM y de los puntos de auxiliares TGAR.
- Estudiar y analizar de las series temporales de datos de marea obtenidas en ambas estaciones.
- Determinación de las constituyentes armónicas de marea en las islas Decepción y Livingston.
- Determinación del Nivel Medio del Mar en las estaciones mareográficas, respecto a los TGBM utilizados.
- Estudiar, analizar y actualizar los datos geodésicos y gravimétricos y realizar un nuevo cálculo y ajuste de las redes geodésicas y gravimétricas establecidas en la Antártida.
- Calcular y determinar un modelo de geoide local de precisión en las islas Decepción y Livingston.
- Comparar el geoide obtenido con los modelos globales existentes y vigentes en la zona, con la finalidad de obtener los errores respecto al modelo experimental y ver de manera objetiva la validez de nuestros resultados en cuanto a precisión respecto a los modelos globales.

## 1.4. Justificación

La relevancia y la justificación de esta Tesis Doctoral, radica en las siguientes razones:

- Permitirá dar una solución al problema del plano de referencia altimétrica y podremos contar con un modelo local de geoide de precisión en la zona, obtenido en base a los datos adquiridos *in situ* y que pueda ser contrastado con los modelos globales existentes.
- A nivel mundial, es de gran importancia en el campo de la geodesia y geofísica, ya que es el primer datum vertical y modelo de geoide precisión en el área de las islas Shetland del Sur (Antártida).
- Los resultados serán de gran apoyo para la investigación científica y proyectos técnicos que se desarrollen en la Antártida, pues permitirá hacer uso de nuevas tecnologías, como

es el caso de la tecnología GNSS-GPS, para determinar las coordenadas altimétricas de forma directa.

- Nos ayudará a formular un diagnóstico de la situación actual en el área de estudio y formular estrategias y líneas de investigación para mejorar los resultados obtenidos.

## 1.5. Delimitación y Alcance

El trabajo de investigación está centrado en la determinación del nivel medio del mar en las islas Livingston y Decepción y la obtención de un modelo local de geoide en isla Decepción y su entorno. El área de estudio se muestra en la Fig. 2.1.

El alcance temporal de la tesis está definido por la fecha de la toma de datos, siendo los más antiguos correspondientes a la Campaña Antártica 2001-2002 (datos GPS, de nivelación geométrica y trigonométrica y datos gravimétricos) y los últimos corresponden a las series temporales de marea tomados desde febrero de 2011 hasta Abril de 2013.

## 1.6. Estructura de la Memoria.

A continuación se describen brevemente los capítulos de esta Tesis Doctoral, con la intención de ofrecer una perspectiva general de la estructura de la Memoria.

En el Capítulo 1 se presenta un resumen del trabajo realizado, a continuación se hace una síntesis de la parte metodológica, explicando el planteamiento del problema, los objetivos, la justificación y la delimitación y alcance del trabajo de investigación, finalizando con una breve descripción de cada capítulo.

En el Capítulo 2, se exponen los antecedentes del trabajo y se hace una descripción del área de estudio, más específicamente la zona del Estrecho de Bransfield, centrado principalmente en las islas Decepción y Livingston y su entorno, haciendo un resumen descriptivo del marco geológico, tectónico, geodésico y oceanográfico con el que contaremos para la realización de las diferentes actividades técnicas y de investigación.

El Capítulo 3, trata sobre la determinación del nivel medio del mar en las islas Decepción y Livingston y su entorno, que es el Estrecho de Bransfield, describiendo la construcción y montaje de las estaciones mareográficas, detallando la infraestructura y equipos necesarios para la adquisición de datos de marea, así como el procesamiento de las series temporales para la obtención de las constituyentes de marea y posterior determinación del nivel medio del mar en cada una de las estaciones.

En el Capítulo 4 se describe toda la metodología para la determinación del geoide de precisión en isla Decepción y la determinación de tres puntos dotados con altura geoidal en isla Livingston, ubicados en las inmediaciones de la Base Antártica Española “Juan Carlos I”. Además, hacemos un estudio comparativo del geoide experimental con modelos globales de

geoide utilizados en el área de estudio y se describe el proceso de presentación de resultados y mapeo de geoide experimental con sus respectivos errores.

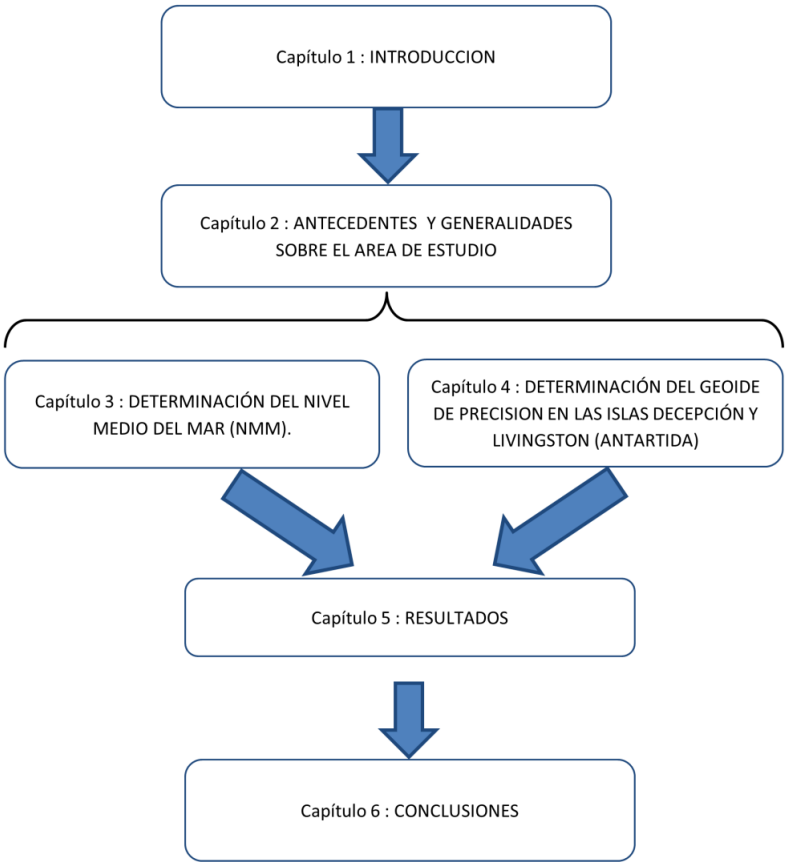



**Figura 1.1:** Estructura de la Tesis Doctoral

Los Capítulos 3 y 4 constituyen el resumen de la parte técnica de nuestro trabajo, nos presenta información básica y fundamental para realizar la investigación propuesta y la metodología a utilizar escogida en base a criterios de interpretación de resultados obtenidos, aplicando modelos matemáticos y las mejores prácticas para el análisis de los datos y la determinación y presentación de los resultados finales. Para ello hemos utilizado aplicaciones específicas de Matlab, software estadístico como R y SPSS para el tratamiento de las series temporales y el software ArcGIS, específico para sistemas de Sistemas Información Geográfica para el tratamiento de datos y presentación de resultados en la determinación del modelo experimental de geoide GeoiDEC14.

En el Capítulo 5 se presentan los resultados de investigación de la Tesis Doctoral, que podemos resumir en cuatro publicaciones científicas, de las cuales una de ellas corresponde a un Capítulo de Libro y las otras tres son artículos científicos, dos de ellos ya publicados y el tercero aceptado y en prensa, en revistas incluidas en el JCR. Los resultados técnicos se adjuntan en los respectivos anexos de la Tesis.

Para finalizar, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones de la investigación realizada, que sintetiza los resultados obtenidos generados a partir de la presente Tesis Doctoral.

La estructura de la presente Tesis Doctoral se esquematiza en la Fig. 1.1, en ella podemos apreciar que los Capítulos 1 y 2 nos dan el soporte conceptual y técnico de todo el estudio realizado, mientras que los Capítulos 3 y 4 constituyen la base técnica del estudio realizado, pues nos proporcionan la base de datos y la metodología a utilizar para la obtención de los resultados de nuestra investigación. Los capítulos 5 y 6 constituyen el resumen de nuestra investigación, en ellos presentamos los resultados de investigación a través de las diferentes publicaciones científicas que han sido el resultado de esta Tesis Doctoral y las conclusiones de nuestro trabajo.

## Capítulo 2

# Antecedentes y generalidades sobre el área de estudio.

### 2.1. Descripción general del área de estudio.

El área de estudio corresponde a las islas Livingston y Decepción, que forman parte del archipiélago de las Shetland del Sur y del estrecho de Bransfield. El estrecho de Bransfield es parte del Océano Glacial Antártico, se encuentra delimitado por el archipiélago de las islas Shetland del Sur al norte, y la península Antártica al sur. El estrecho tiene unos 500 km de longitud y unos 120 km de ancho medio y es una cuenca marginal activa en donde se ha identificado un eje de extensión con dirección NE-SW entre los paralelos 60º y 63º sur, está protegido del mar abierto por las islas Smith, Snow y Livingston por el norte y al oeste, y por las islas Greenwich, Robert, Nelson y Rey Jorge, al norte y al este (Lenn et. al. 2003).

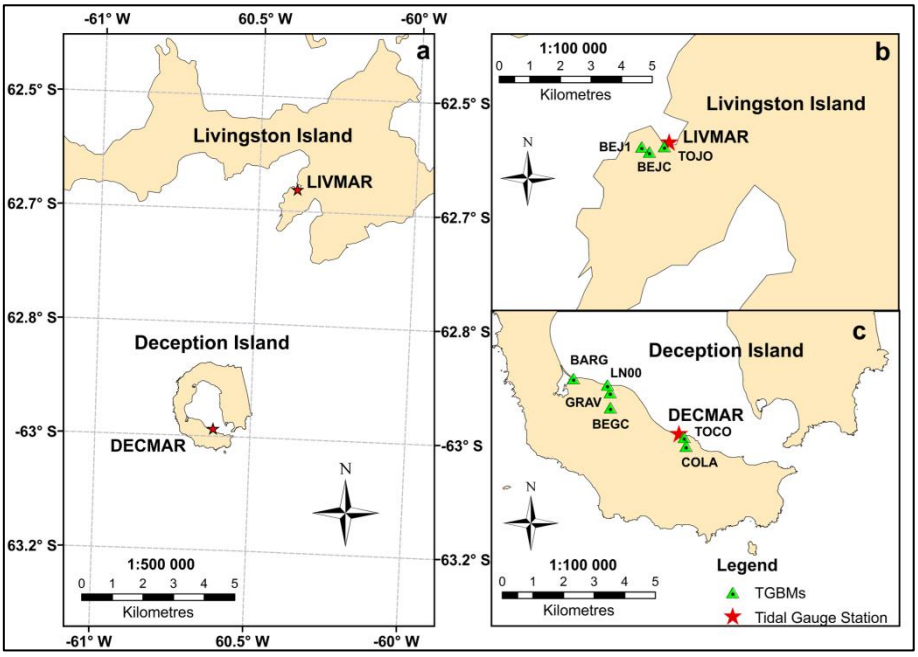



**Figura 2.1:** **a.** Area de estudio, mostrando la ubicación de las estaciones mareográficas **b.** Isla Livingston, ubicación de LIVMAR y sus vértices y TGBM **c.** Isla Decepción, ubicación de DECMAR y sus vértices y TGBM.

La isla Decepción es un estrato-volcán activo cuaternario que tiene forma de herradura y un diámetro máximo de unos 16 kilómetros. Está rodeada por un cinturón montañoso con una

bahía en su interior llamada Puerto Foster. La bahía tiene un ancho (E-W) de unos 7 kilómetros y un largo (N-S) de unos 10 kilómetros. El cinturón montañoso de la isla se eleva unos 539 metros sobre el nivel del mar en el monte Pond, ubicado al este de la isla y que constituye el punto más alto; por el oeste, el punto más elevado es el monte Kirkwood con 452 m.s.n.m. Ambos accidentes están cubiertos por el hielo de forma permanente. En la Fig. 2.2 se pueden apreciar la forma y topografía de la isla y en la Fig. 2.3 la toponimia de los principales puntos y accidentes de la isla.

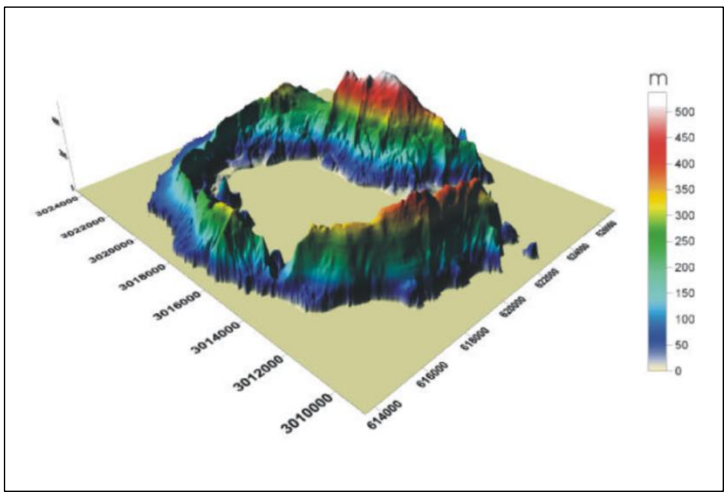



**Figura 2.2:** Isla Decepción, topografía de la isla generada en base a un modelo digital del terreno (DTM). Adaptado de (Agudo 2003).

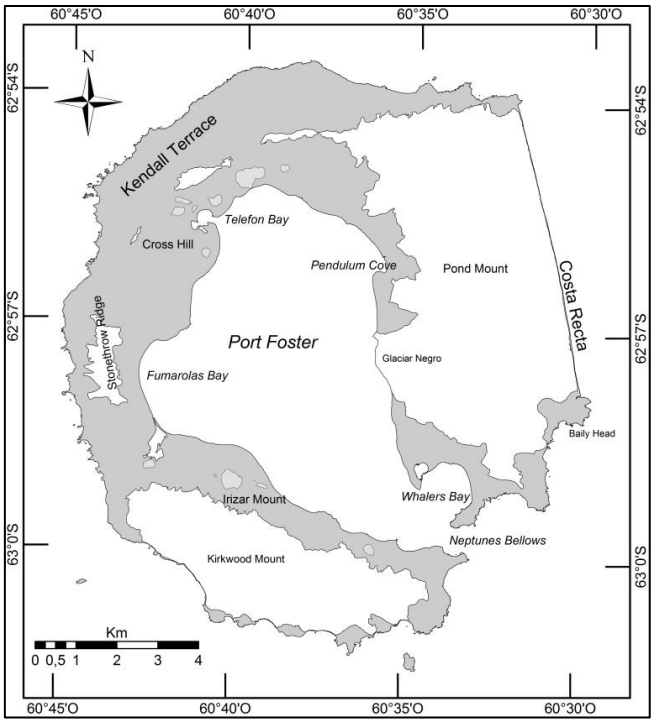



**Figura 2.3:** Toponimia de isla Decepción

La bahía de Puerto Foster ha sido considerada tradicionalmente como la caldera de colapso del volcán Decepción que fue invadida por el mar a consecuencia de una rotura en el sudeste que ha dado origen a un paso angosto y poco profundo llamado los Fuelles de Neptuno. La bahía se comunica al estrecho de Bransfield a través de este paso, de unos 500 metros de ancho, y que también es el acceso al puerto natural o bahía interior. Una explicación detallada de las diferentes hipótesis de la formación de la bahía podemos verla en (Baraldo 1999, Baraldo & Rinaldi 2000, Smith et al. 2003, Fernández-Ros 2006). En la isla Decepción se encuentran establecidas dos bases antárticas, la BAE Gabriel de Castilla y la BAA Decepción; además se encuentran las ruinas de la BACH Presidente Pedro Aguirre Cerdá cuyo funcionamiento terminó violenta y definitivamente el 4 de diciembre de 1967 con la erupción volcánica que destruyó la base. También tenemos las ruinas de una factoría Ballenera que estuvo operativa hasta 1931 y de la BAB Station B – Deception Island que fue abandonada el 23 de febrero de 1969. En la isla también se encuentra instalada la estación mareográfica DECMAR, ubicada en punta Colatinas a unos 3 km al sur de la BAE Gabriel de Castilla y aproximadamente a la misma distancia de los Fuelles de Neptuno. En la Fig. 2.4 vemos el primer mapa topográfico de isla Decepción de 1829, cuyo autor es el Teniente E. N. Kendall.

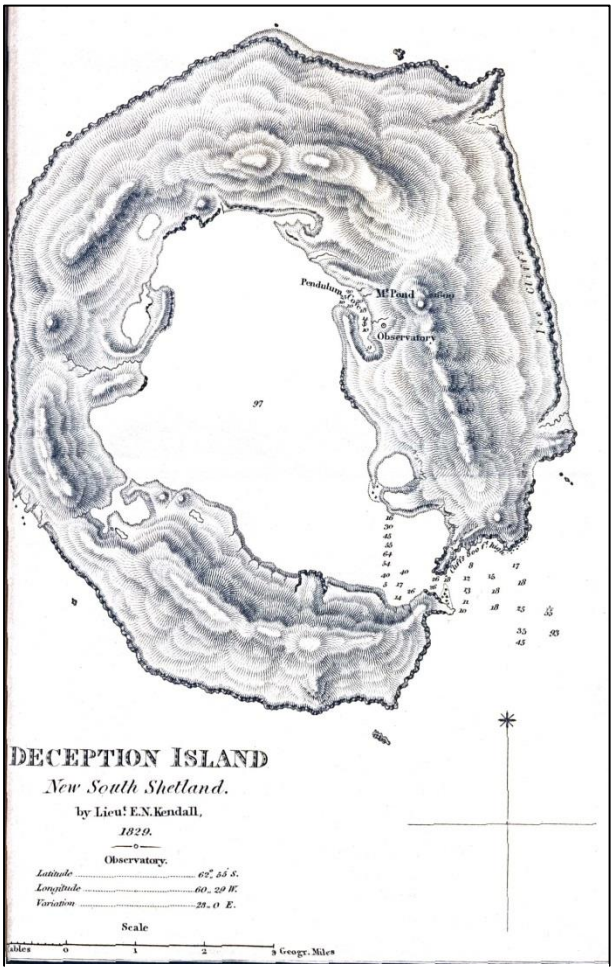



**Figura 2.4:** Mapa topográfico de isla Decepción. Elaborado por el Tte. Kendall en 1829.

La isla Livingston es la segunda en superficie de las islas Shetland del Sur, se ubica en latitud 62°37′ Sur y longitud 60°27′ Oeste, entre la isla Snow al oeste (separada por el estrecho Morton) y la isla Greenwich por el este (separada por el estrecho McFarlane). Tiene una longitud promedio de unos 70 kilómetros y un ancho variable entre los 4 y los 32 kilómetros. Su relieve es muy irregular con costas altas e inaccesibles. Destacan en la isla el cabo Shirreff al norte, la punta Botev al sur, la punta Pin o Alfiler (punta Renier) al este, la punta Start al oeste. El punto más alto de la isla es el monte Barnard o Friesland de unos 1.700 m.s.n.m. En esta isla se encuentran las bases antárticas Juan Carlos I (España), San Clemente Ohridski (Bulgaria)

en Bahía Sur y la Base Shirreff (Chile) y Cape Shirreff Field Station (Estados Unidos) en Cabo Shirreff al norte de la isla. También se encuentra el Campamento Científico Byers, al oeste de la isla y ubicado en la península del mismo nombre, perteneciente a la Argentina. La estación mareográfica LIVMAR se encuentra instalada en Caleta Johnson muy cerca de la BAE Juan Carlos I. A unos 20 km al sur de Livingston se encuentra la isla Decepción, siendo la distancia de navegación entre ambas bases de unos 50 kilómetros. La Fig. 2.5 muestra los principales accidentes geográficos y lugares de referencia de isla Livingston.

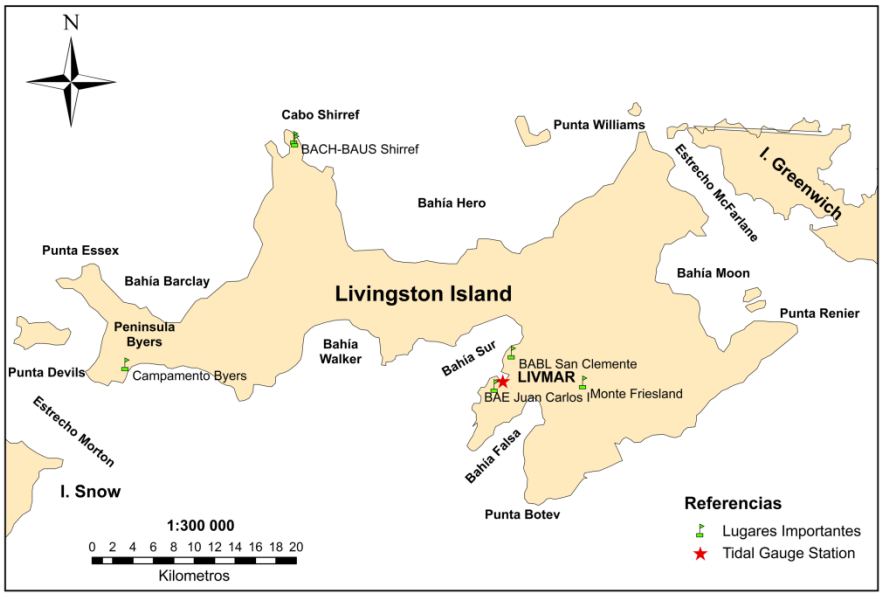



**Figura 2.5:** Isla Livingston y sus principales referencias geográficas

## 2.2. Marco geológico y tectónico

La cuenca del Bransfield está situada entre la península Antártica y el archipiélago de las Shetland del Sur. Las islas Livingston y Decepción, forman parte de este archipiélago y se encuentran localizadas en el límite norte del estrecho, siguiendo aproximadamente la prolongación del eje de expansión de la cuenca NE-SO. Ver Fig. 2.7

El proceso de generación de la Cuenca del Bransfield comienza con la Península Antártica unida a Sudamérica durante el Mesozoico y parte del Cenozoico, que luego fue afectada por la interacción de micro placas que generó el arco de Scotia (Barker et al. 1975, 1991, Dalziel 1984, Baraldo 1999, Smellie 2001). La formación de la cuenca puede ser datada a partir de los últimos 200 Ma, entre el período Jurásico y el Cretácico hasta el Terciario y se debe a un proceso de extensión cortical con una orientación NE-SO de unos 500 kilómetros de longitud. Según muchos estudios estaría relacionada con la zona de subducción situada al oeste de las islas Shetland del Sur, límite de convergencia de las placas Antártica y Phoenix. Este

movimiento convergente de placas puede que haya cesado hace unos 6 Ma. (González-Ferrán 1985, Smellie 1991, Baker et al. 1991, Smellie et al. 1995, Gonzalez-Casado et al. 1999, Baraldo & Rinaldi 2000, Jin et al. 2009). Sin embargo, y como consecuencia, la región de la placa del Pacifico está fragmentada por varias fallas, las que mayor influencia tienen en la cuenca son la falla de Shackleton al noroeste y Hero al sudoeste, que han dado lugar a la formación de las micro placas de Phoenix y Shetland del Sur. Aunque esta zona de subducción se ha vuelto cada vez menos activa, sin embargo el segmento que corresponde a las Shetland del sur, entre las fallas de Shackleton y Hero, es de las últimas regiones más activas de la Antártida (Baker & Burrel 1977). Las investigaciones de Jin et al. (2009), realizadas en base a estudios de estructuras sísmicas multicanal, propone que, aunque la actividad de subducción disminuyó bruscamente hace unos 6 Ma y se detuvo o se volvió muy lenta tras el cese de la extensión en el Paso de Drake, hace alrededor de 3,3 Ma; sin embargo, posteriormente se han dado procesos de compresivos en la fosa de las Shetland del Sur y en la zona de extensión del Estrecho de Bransfield, al sur de las islas Shetland del Sur, que nos indican que el proceso de subducción continua activo. En Fig. 2.7 los límites de placas y las fracturas que en la actualidad conforman el marco tectónico regional.

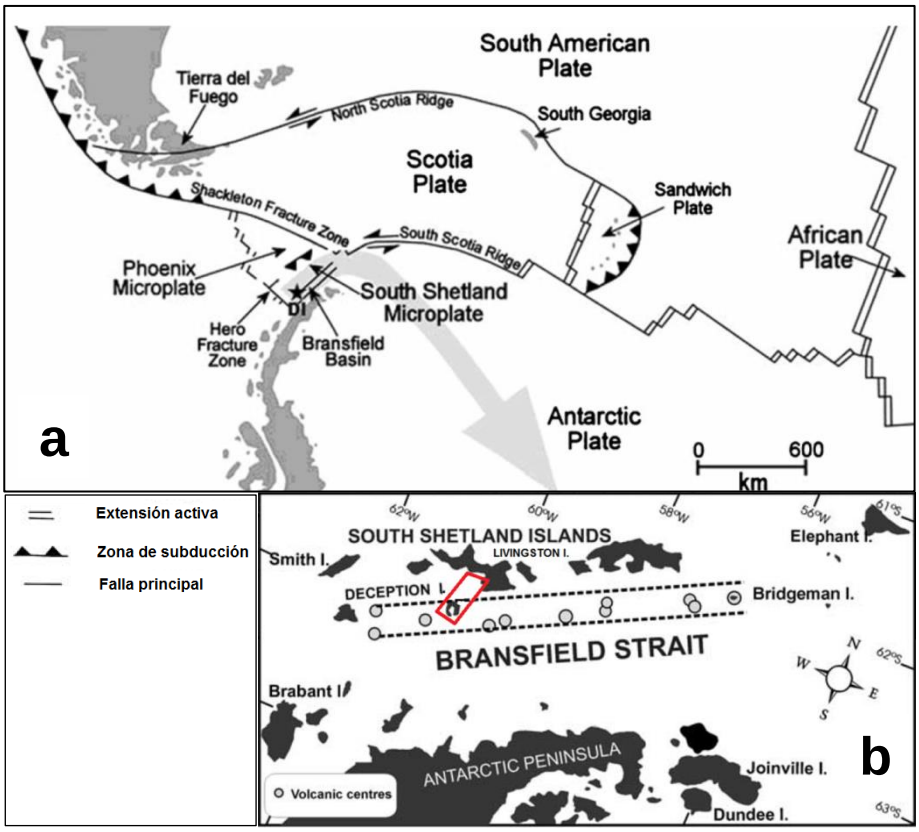



**Figura 2.6:** Marco tectónico regional en el área de estudio. **a.** Se aprecian los bordes convergentes y divergentes entre la micro- placa de Scotia y las placas Sudamericana y Antártica. **b.** Ubicación de los diferentes edificios volcánicos en el estrecho de Bransfield y del área de estudio (polígono rojo). Adaptado de (Somoza et al. 2004, Prates 2012).

La cuenca central del Bransfield presenta una configuración tectónica asociada con la subducción activa y un centro expansivo tras-arco conformándose como un rift de expansión con su eje en la dirección NE-SW. La zona central y más activa de esta cuenca se halla delimitada por las islas Decepción al oeste y la isla Bridgeman al este y por dos márgenes asimétricos: el de las islas Shetland del sur al norte y la península Antártica al sur. La cuenca está ocupada por seis edificios volcánicos, principalmente submarinos, alineados aproximadamente según la dirección principal de la propia cuenca. Tiene una actividad volcánica reciente manifestada por los volcanes Bridgeman, Penguin y Decepción, siendo este último (63º00' S, 60º35' W) el más destacado y que en la actualidad es uno de los pocos volcanes activos existentes en la Antártida, cuyas últimas erupciones se dieron entre 1967 y 1970 (Canals et al. 1997, Somoza et al. 2004, Prates 2012). Muchos autores consideran que el volcanismo activo en la cuenca central del Bransfield, unido a los procesos de expansión de la cuenca y a los procesos magmáticos en el rift es de ocurrencia geológica muy reciente, menor a 2 Ma y confirman que la actividad volcánica a lo largo del Bransfield continua en desarrollo, con altas probabilidades de nuevas crisis y erupciones a corto y medio plazo, tanto en las islas como en cualquiera de los volcanes submarinos (González-Ferrán, 1985, 1991, Agudo, 2003, Galindo-Zaldívar et al. 2004, Jin et. al. 2009, Schreider et al. 2015).

Los edificios volcánicos mayores tienen un diámetro base de unos 15 kilómetros aproximadamente y 450 metros de altura y presentan diferentes estadios de evolución que van desde un cono volcánico, hasta la obliteración del mismo al ser partido en dos como consecuencia de la tectónica de divergencia. Existen unos 34 edificios menores, de unos 2,5 kilómetros de diámetro por término medio (Fernández-Ros, 2006). La ubicación de los volcanes se muestra en la Fig. 2.7b.

La cuenca tiene 60 kilómetros de ancho , unos 230 kilómetros de longitud y 1.950 metros de profundidad máxima. El margen de las islas Shetland del Sur es muy estrecho y rectilíneo, entre 6 y 15 kilómetros, que configura una topografía muy abrupta, con pendientes entre 25º y 30º (Canals et al. 1997). En las zonas superiores del talud, los levantamientos batimétricos han detectado numerosos cañones que se prolongan hasta las bahías de las diferentes islas (González-Ferrán, 1985).

En los alrededores de la isla Decepción zona sudoeste de la cuenca central del Bransfield, se caracteriza por la presencia de una pronunciada elevación topográfica, con estructuras generadas a lo largo del rift en su zona central y noreste junto con alineamientos y estructuras que denotan la presencia de estructuras de rumbo alrededor de la isla originadas por la acción de la Zona de Fractura de Hero (Canals et al. 1997, Baraldo 1999, Baraldo & Rinaldi 2000, Baraldo et al. 2003).

La cuenca del Bransfield, geodinamicamente se encuentra asociada a un área muy compleja, comprende parte del cono sur del continente americano, el pasaje de Drake, las islas Shetland del Sur y la península Antártica, como se aprecia en las Figs 1.1, 2.6, 2.8, 2.8 y 2.9.

Esta complejidad se debe a la confluencia de dos placas tectónicas principales, la placa Sudamericana y la placa Antártica, y cuatro micro placas que interactúan, la de Scotia, Drake (ex-Phoenix), Sandwich y la de las Shetland del Sur, creando un entorno geodinámico muy complejo, atribuido a la extensión del trans-arco de la cuenca del Bransfield y a la compresión de micro placa Phoenix que subduce bajo la placa Antártica. Como consecuencia esta zona tiene un movimiento tectónico de 1,0 cm / año, según varios autores que han estudiado la zona (González-Ferrán 1991, Canals et al. 1997, Gràcia et al. 1996, 1997, Baraldo 1999, Baraldo & Rinaldi 2000, Barker 2001, Baraldo et al. 2003, Taylor et al. 2008). En general, el movimiento ha sido atribuido a la extensión del tras-arco del Bransfield y la subducción de la micro placa de Phoenix bajo la placa Antártica. Varios autores sugieren que al menos un centenar de kilómetros de la placa de Phoenix ha subducido por debajo del Estrecho de Bransfield desde hace unos 50 Ma y que la misma cesó después de la apertura Phoenix-Antártica hace unos 3,3 Ma (Baker 1982, Livermore et al. 2000, Robertson-Maurice et al. 2001, 2003, Solari et al. 2008, Jin et al. 2009).

Para explicar este proceso extensivo en el estrecho del Bransfield, se tienen dos modelos, que han sido desarrollados por diferentes autores que han estudiado la zona (Agudo 2003, Galé et al. 2103).

El primer modelo que relaciona la formación con la migración de las islas Shetland del Sur hacia el Noroeste, debido a un efecto de retroceso de la fosa de las Shetland del Sur. Este proceso afecta a toda la corteza y todo indica que estaría relacionado con el proceso de subducción de la microplaca Phoenix que se introduce por debajo de la microplaca de las Shetland del Sur. También, este proceso lleva implícito el cese de la extensión de las placas Antártida-Phoenix en el pasaje de Drake que da comienzo al retroceso en la subducción (Smellie et al. 1984, Maldonado et al. 1994, Lawer et al. 1995, 1996, Galindo-Zaldívar et al. 2004). De acuerdo con este modelo, la cuenca extensional asociada migraría hacia el noroeste. Esta expansión cesaría hace 4 Ma., cuando finalizó la apertura del Paso de Drake, dando lugar a que la antigua Placa Phoenix pasase a formar parte de la Placa Antártica (Barker 1982). Sin embargo, el análisis de mecanismos focales de terremotos (Pelayo & Wiens 1989) y la información obtenida del estudio de perfiles sísmicos de reflexión multicanal migrados, realizados a través de la Fosa de las Shetland del Sur (Maldonado et al. 1994, Jin et al 2009) proporcionan evidencias que apoyan que la subducción a lo largo del margen septentrional de las Shetland del Sur ha seguido siendo activa hasta la actualidad. Por lo tanto, la finalización de la expansión oceánica de la Placa Phoenix no supone la terminación de los procesos de subducción, ya que la corteza oceánica más antigua y densa de la antigua Placa Phoenix sigue hundiéndose bajo el Bloque de las Shetland del Sur hasta el presente, debido a su propio peso.

El segundo modelo, propuesto por (González-Casado et al. 2000, Giner-Robles et al. 2003) es más nuevo y explica la formación y evolución dinámica de la Cuenca del Bransfield debida a un régimen transtensivo asociado al movimiento relativo de las placas Scotia y

Antártica. Para este modelo tendríamos un proceso de extensión NO-SE que aparece en el estrecho de Bransfield dentro de un régimen de compresión NE-SO entre las placas de Scotia y Antártica a lo largo de la dorsal Sur de la placa de Scotia. Este modelo, hace un estudio a partir de datos de mecanismos focales de terremotos utilizando la base de datos CMT (Dziewonsky & Woodhouse, 1983) y un análisis poblacional de fallas en la zona. Del estudio se deducen cuatro soluciones tensoriales para la zona: tres tensores transpresivos con compresión NE-SO en contacto entre las placas de Scotia y Antártida y un tensor extensional NO-SE en el estrecho de Bransfield. Estos tensores de esfuerzos se ajustan al modelo cinemático propuesto previamente para el límite de placas de la dorsal del sur de Scotia y para la región del Bransfield. Sin embargo, bajo este campo de esfuerzos el límite de placas representado por la zona de fractura de Shackleton tendría un carácter convergente y no transcurrente, como se había propuesto en el modelo anterior.

Sin embargo, otros autores plantean que ambos modelos pueden haber actuado simultáneamente y que el desarrollo de la Cuenca de Bransfield será, por lo tanto, el resultado de la subducción por el hundimiento de la antigua Placa Phoenix bajo la Placa Antártica así como por el movimiento transcurrente sinistrorso entre ambas placas (Galindo-Zaldívar et al. 2004, Maestro et al. 2007, Solari et al. 2008).

La mayor parte de nuestro trabajo está centrado en isla Decepción, es un volcán activo que data de la época cuaternaria con una edad geológica menor a los 0.75 Ma (Valencio et al. 1979, Galé et al. 2014). La secuencia volcánica de construcción de la isla evolucionó desde las lavas submarinas almohadilladas hasta las erupciones subaéreas principalmente estrombolianas y freatomagmáticas (Baker et al. 1975, Smellie 2001, Smellie et al. 2002, Martí et al. 1996, Maestro et al. 2007), que nos indica, que la isla evolucionó debido a la caída causada por esfuerzos regionales de un enorme edificio volcánico. El paisaje actual muestra una isla en forma de herradura con una caldera colapsada y que ha sido inundada por el mar y que actualmente está muy bien desarrollada formando una bahía interior, que es Puerto Foster (Figs 2.2, 2.3, 2.4 y 2.10). El volcanismo histórico en isla Decepción afectó principalmente el borde interior de la caldera volcánica y está asociado con fracturas regionales de orientación NNW-SSE, (Martí et al. 1996). El límite de la caldera y el risco de fractura han afectado a la ubicación de los depósitos pre-caldera, de los centros eruptivos post-caldera y de los conos volcánicos de escoria (Smellie 2001, 2002, Smellie et al. 2002). Las erupciones que se daban a mayor altura fueron de tipo estromboliano, con volúmenes pequeños de magma y duraciones que iban desde horas a días. Posteriormente a esta actividad volcánica se dieron emisiones de pequeños flujos de lava que fluían hacia Puerto Foster. Las erupciones que se produjeron en cotas más bajas se dieron principalmente en cráteres tipo *maar* (cráter volcánico ancho y de poca profundidad, producido por una erupción freatomagmática) y eran de tipo freatomagmáticas. Históricamente las erupciones que se conocen del volcán Decepción tuvieron lugar en 1842, 1912, 1917, 1967, 1969 y 1970 (Smellie et al. 2002, Berrocoso et al. 2012) y que se muestran en la Fig. 2.7.

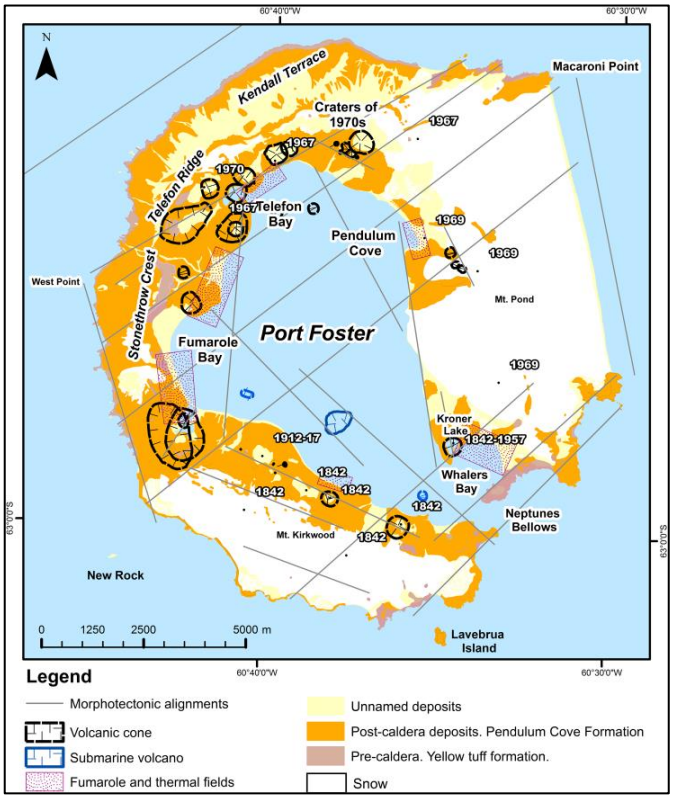



**Figura 2.7:** Mapa con los principales elementos geológicos, vulcanológicos y erupciones históricas en isla Decepción.

## 2.3. Marco geodésico y gravimétrico.

Desde el inicio de las campañas antárticas españolas, fines de la década de los 80, y aprovechando la total operatividad del sistemas de posicionamiento GPS y sus grandes prestaciones geodésicas, en cuanto a disponibilidad, precisión y facilidad para el establecimiento de redes, se dio un gran impulso al establecimiento de redes geodésicas GPS de alta precisión en la Antártida. El uso de estas nuevas tecnologías causó una verdadera revolución en los conceptos de la geodesia clásica y convencional, y aprovechando todas estas ventajas se decidió establecer redes geodésicas regionales y locales en la Antártida, para diferentes fines. El diseño de estas redes fue realizado tomando en cuenta especificaciones geodésicas pero orientadas hacia aplicaciones en geodinámica, considerando además, que la mayoría de los estudios se realizarían en el complejo volcano-tectónico existente en la zona delimitada por las islas Shetland del Sur, el mar de Bransfield y la península Antártica.

El marco de referencia geodésico de nuestra área de estudio está compuesto por las diferentes redes geodésicas establecidas en la Antártida, entre las que se encuentran: Red Geodésica Antártica Española (RGAE), Red Geodésica de isla Decepción (REGID), Red de Nivelación de isla Decepción (RENID) y la Red Gravimétrica de isla Decepción (REGRID), esta última constituye el marco gravimétrico de la isla (Berrocoso et al. 2006a, 2006b, 2006c,

2008). Todas las estaciones de estas redes están dotados de coordenadas geocéntricas tridimensionales (X, Y, Z), transformadas a coordenadas geodésicas Latitud (φ), Longitud (λ) y altura elipsoidal (h) referidas al Marco Internacional de Referencia Terrestre ITRF2000.0 (Altamimi et al. 2002) y ajustadas con un cierre de precisión milimétrico, como veremos más adelante. Para trabajar cartográficamente de manera más práctica las coordenadas han sido proyectadas a coordenadas planas rectangulares utilizando la Cuadrícula UTM (Universal Transversa de Mercator) para la Zona UTM 20 Sur, cuyo Meridiano Central es el que corresponde a la Longitud 63º Oeste. Los datos GPS para el posicionamiento preciso de los vértices geodésicos y marcas de nivelación y fueron tomados de los trabajos realizados por el LAGC-UCA desde la campaña 1989-1990 (Berrocoso et al. 2008). A continuación describiremos cada una de las redes geodésicas establecidas en nuestra área de estudio.

### *2.3.1. Red Geodésica Antártica Española (RGAE)*

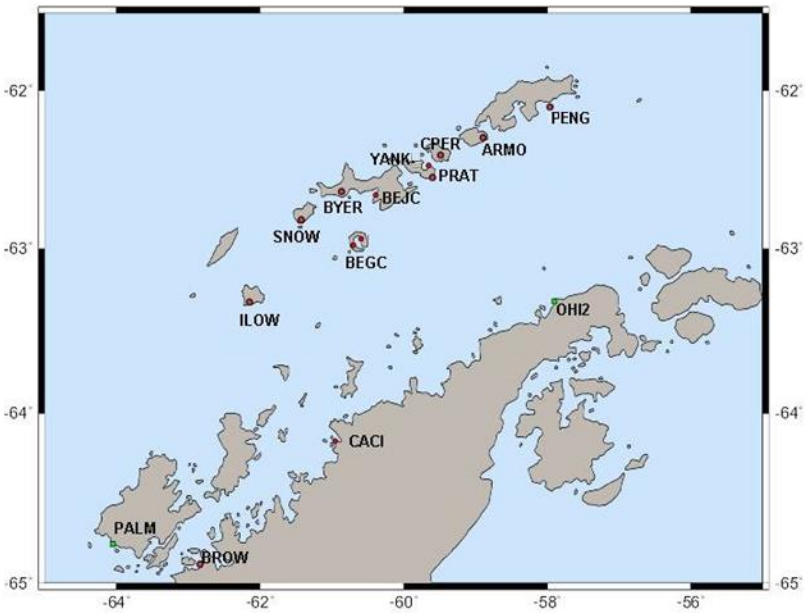



**Figura 2.8:** Red RGAE, vértices geodésicos.

La RGAE una red geodésica de ámbito regional diseñada por investigadores españoles, con la finalidad de definir un marco de referencia geodésico en la región formada por las islas Shetland del Sur, el mar de Bransfield y la península Antártica. Los vértices de la red fueron establecidos en las islas Shetland del Sur y en la Península Antártica. Están dotados de coordenadas geodésicas absolutas y ubicados en isla Livingston BAE Juan Carlos I (BEJC), isla Decepción BAE Gabriel de Castilla (BEGC), en las Bases chilenas Prat en la isla Greemwich (PRAT), O`Higgins en la Península Antártica (OHI2), en las BAA Almirante Brown en Bahía Paraíso en la Península Antártica (BROW), BAUS Palmer en isla Anvers (PALM), Campamento Byers en isla Livingston (BYER), Isla Nelson (ARMO), Isla Pinguino (PING), Isla Robert (CPER), Isla Greenwich (YANK), Isla Snow (SNOW), Isla Low (ILOW).

Durante la campaña 2003-04 se añadió un nuevo vértice en la Península Antártica, en la BAA Primavera en Caleta Cierva (CACI). A partir de algunos vértices de esta red se determinaron las coordenadas de los vértices de la red REGID. En la Fig. 2.11 vemos la distribución de la red RGAE.

### *2.3.2. Red Geodésica de Isla Decepción (REGID)*

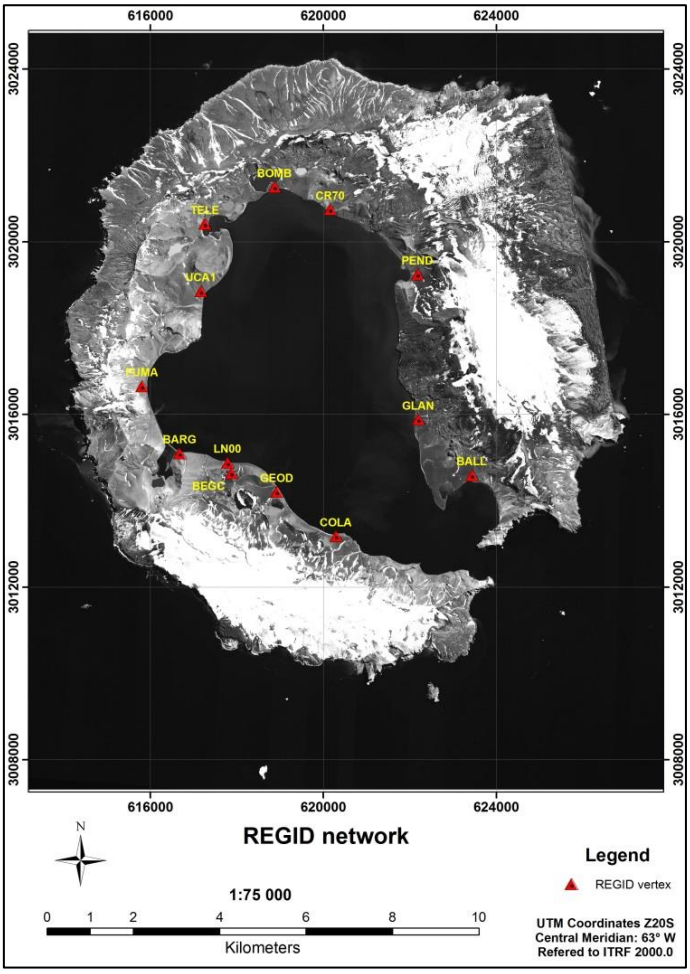



**Figura 2.9:** Red geodésica REGID

La REGID es una red geodésica local, establecida específicamente en isla Decepción, a partir de 1988 y en las sucesivas campañas antárticas. Los datos GPS utilizados para obtener las coordenadas geodésicas y alturas elipsoidales corresponden a las campañas antárticas desde 1989 al 2003 y principalmente a la campaña 2002-03, de noviembre 2002 a febrero de 2003 (Berrocoso et al. 2006a, 2006b, 2006c, 2008).

Esta red fue establecida con un doble propósito: por un lado constituir el marco de referencia geodésico para cualquier actividad científica o técnica y por otro establecer los puntos de control para determinar los modelos de deformación horizontal debidos a la actividad

volcano-tectónica. Dados los proyectos geodésicos y geofísicos realizados en la isla, finalmente la red REGID ha sido utilizada para varios fines, determinar los modelos de deformación, tanto horizontales como verticales y definir el marco de referencia geográfico y gravimétrico para calcular el geoide experimental de isla Decepción (GeoiDEC14).

El diseño y el establecimiento de la red han sido planificados tomando en cuenta las características especiales de la isla. La red está constituida por 12 vértices geodésicos distribuidos alrededor de la bahía interior, restricción debida principalmente a las condiciones topográficas de la isla que ha condicionado la construcción de las estaciones a zonas cercanas a la costa. Los vértices que componen la red son: BEGC (Base Gabriel de Castilla), BARG (Base Argentina), FUMA (Bahía Fumarolas), PEND (Caleta Péndulo), BALL (Caleta Balleneros), COLA (Colatinas), GEOD (Crater Soto), UCA1 (Campo de Obsidianas), TELE (Bahía Teléfono), BOMB (Campo de Bombas), CR70 (Campo de Cráteres de 1970) y GLAN (Glaciar Negro). La marca geodésica LN00 ha sido incluido en la red REGID, pues constituye el Punto Fundamental de Referencia Vertical de la red (Berrocoso et al., 2006a), ver Fig. 2.12.

En la isla Livingston, se utilizó el vértice geodésico BEJC (Base Antártica Española Juan Carlos I) perteneciente a la red RGAE, y posteriormente el vértice geodésico BEJ1, instalado para reemplazar el anterior que fue afectado por la construcción de las nuevas instalaciones de la base. BEJC es el Punto Fundamental de Referencia Vertical en Isla Livingston y entre otras cosas, nos ha servido para determinar la ondulación del geoide en los alrededores de la base.

Los equipos utilizados para las observaciones GPS está compuesto por receptores geodésicos Leica, modelo GX1230 y TRIMBLE, modelo 5700, que tienen una precisión (RMS) igual a 5 mm + 0,5 ppm en horizontal y 10 mm + 0,5 ppm en vertical, para levantamientos estáticos, en post-proceso con fase de la portadora y con antena geodésica estándar. Los datos fueron registrados con una frecuencia de muestreo de 1 segundo y una máscara de elevación se fijó a 10º. Para procesamiento de datos GPS se utilizó el software científico BERNESE versión 5.0 (Beutler et al. 2001), para obtener una posición de las estaciones de la red se utilizó como estación de referencia al vértice BEGC, ubicado en las inmediaciones de la Base Antártica Española "Gabriel de Castilla". Para el procesado se utilizaron las efemérides precisas y archivos de movimiento del polo, distribuidos por el IGS (Servicio Internacional de GNSS). Todas las líneas de base se procesaron utilizando la estrategia de resolución de ambigüedades QIF (Quasi Ionosphere Free) y los parámetros troposféricos fueron estimados a partir de un modelo troposférico de Saastamoinen, como se sugieren (Bouin & Vigny 2000) para el procesamiento de datos GPS en las regiones antárticas.

El ajuste de la red se llevó a cabo en dos etapas: en primer lugar, se obtuvieron coordenadas geocéntricas absolutas para la estación BEGC en la isla Decepción, procesando la red respecto a la estación IGS OHI2 (Estación BACH O'Higgins) ubicada en la península Antártica y la estación geodésica BEJC ubicada en la isla Livingston (Figura 3); en un segundo paso, se procesaron las coordenadas de las estaciones restantes de la isla Decepción con

respecto a la estación BEGC (BAE Gabriel de castilla), utilizada como estación de referencia. Las coordenadas ajustadas de la red geodésica REGID se muestran en la Tabla 2.1.

| # | POINT | Latitude S (º ' " ) | | | Longitude W (º ' " ) | | | h (m) | σφ (m) | σλ (μ) | σh (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | **BEGC** | 62 | 58 | 43.6576 | 60 | 40 | 27.5304 | 82.070 | 0.001 | 0.001 | 0.002 |
| 2 | **BALL** | 62 | 58 | 38.5553 | 60 | 33 | 52.5089 | 25.968 | 0.003 | 0.001 | 0.006 |
| 3 | **FUMA** | 62 | 57 | 41.0170 | 60 | 42 | 59.3471 | 22.911 | 0.001 | 0.001 | 0.006 |
| 4 | **PEND** | 62 | 56 | 09.8456 | 60 | 35 | 34.3437 | 28.841 | 0.001 | 0.001 | 0.003 |
| 5 | **COLA** | 62 | 59 | 27.9180 | 60 | 37 | 31.8014 | 48.050 | 0.003 | 0.001 | 0.009 |
| 6 | **GLAN** | 62 | 57 | 58.3621 | 60 | 35 | 23.8528 | 27.541 | 0.003 | 0.003 | 0.012 |
| 7 | **GEOD** | 62 | 58 | 56.4127 | 60 | 39 | 11.7290 | 42.182 | 0.003 | 0.001 | 0.009 |
| 8 | **UCA1** | 62 | 56 | 28.4103 | 60 | 41 | 28.0891 | 28.667 | 0.003 | 0.001 | 0.009 |
| 9 | **CR70** | 62 | 55 | 23.6706 | 60 | 38 | 01.0013 | 23.600 | 0.003 | 0.003 | 0.015 |
| 10 | **TELE** | 62 | 55 | 37.9905 | 60 | 41 | 25.5485 | 23.791 | 0.003 | 0.003 | 0.012 |
| 11 | **BOMB** | 62 | 55 | 08.4201 | 60 | 39 | 33.8481 | 23.785 | 0.003 | 0.003 | 0.015 |
| 12 | **BARG** | 62 | 58 | 30.2679 | 60 | 41 | 53.3601 | 22.283 | 0.001 | 0.001 | 0.006 |

**Tabla 2.1:** Estaciones red REGID. Coordenadas referidas al sistema ITRF 2000.0.

La red REGID y su marco de referencia geográfico fueron diseñados para ser utilizados principalmente para estudios geodinámicos, aplicando técnicas geodésicas GNSS-GPS (Berrocoso et al., 2008). Por esta razón, los vértices geodésicos fueron construidos de acuerdo a normas para redes geodésicas GNSS de nivel C (Seeber 2003).

La materialización de la red en el terreno se ha realizado mediante monumentos construidos con hormigón, formada generalmente por una base de tipo prismática introducida en la capa superior de tierra y asegurada en el permafrost mediante barras de acero. Esta base tiene 0,40 m de lado y una altura variable desde el fondo, sobresaliendo unos 0,20 m sobre el nivel del suelo. Incrustado y fijado en el centro de esta base se coloca un tornillo de acero inoxidable que sobresale unos 5 cm. y cuyo centro marcado con un punto la referencia horizontal, mientras que la referencia vertical está materializada por la parte superior de una tuerca de acero inoxidable. Para asegurar la posición correcta y la altura del centro de fase de la antena GPS respecto a las referencias horizontal y vertical del vértice en cada campaña, se utilizó un calibrador de altura de antena de unos 13 centímetros de longitud, cuya medida está realizada en laboratorio (Prates et al. 2013), para más detalles ver la Fig. 2.13.

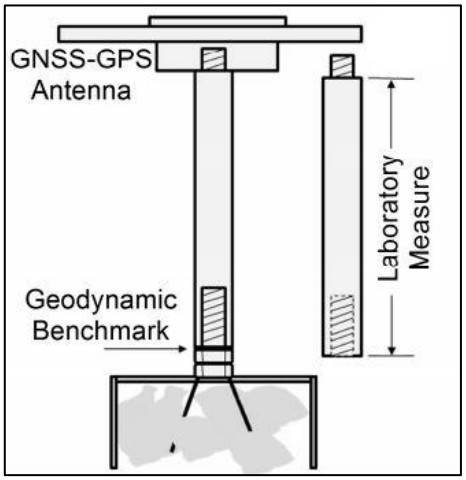



**Figura 2.10:** Estructura de los vértices de la red REGID

### *2.3.3. Red de Nivelación de Isla Decepción ( RENID).*

La red de nivelación RENID consta de 60 marcas de referencia, divididas en 6 líneas de nivelación independientes. El punto fundamental de referencia de altitud es el LN00, situado junto a la BAE Gabriel de Castilla. La altura ortométrica de LN00 se determinó mediante una nivelación geométrica a partir del vértice geodésico y marca de referencia del mareógrafo (TGBM) COLA, ubicado en Punta Colatinas, cuya altura ortométrica fue determinada en los trabajos llevados a cabo por (Vidal et al. 2012) y (Jigena et al. 2014). Cada línea de nivelación está vinculada con al menos uno de los vértices geodésicos de la red REGID, excepto la línea de nivelación 4, que se vincula el punto LN00, que es el Punto Fundamental de Referencia de Altitud. La Fig. 2.14 muestra las diferentes líneas de nivelación que componen la red RENID y los vértices geodésicos de la red REGID a los que están vinculados.

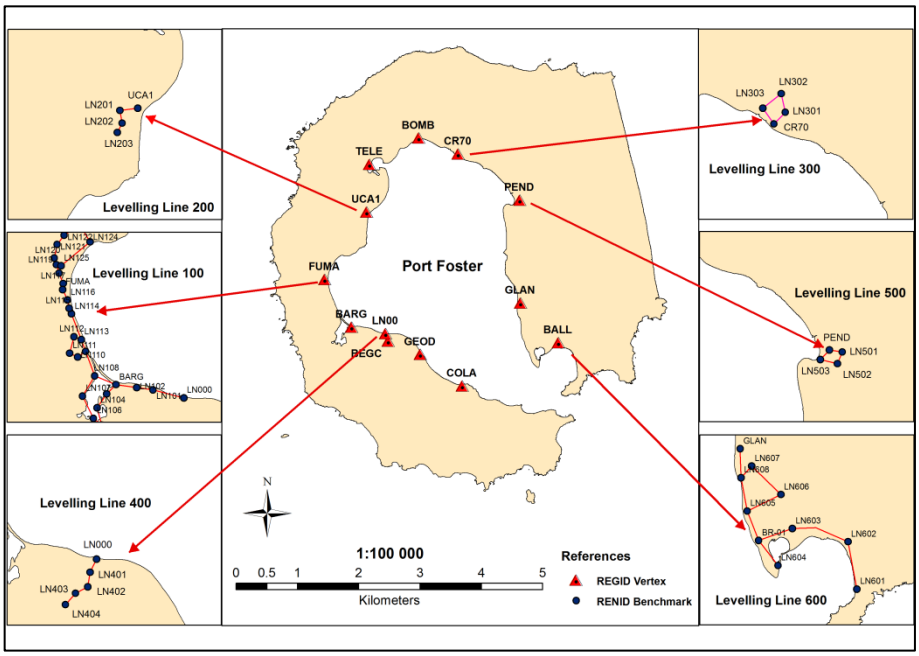



**Figura 2.11:** Red de Nivelación de Isla Decepción , RENID

Los levantamientos de nivelación geométrica para el establecimiento de la red RENID fueron realizados durante las campañas antárticas 2001-02 y 2002-03. La nivelación geométrica se llevó a cabo utilizando un nivel óptico Laica modelo NA2, que tiene una precisión de ± 0,7 mm / km para una nivelación doble ( ida y vuelta). La nivelación trigonométrica y los enlaces geodésicos se realizaron con una estación total Leica, modelo TPS 403 que tiene una desviación estándar de 3” de resolución en la lectura angular (para ángulos horizontales y verticales), y una precisión en distancias de ± 2 mm + 2 ppm para una distancia máxima de 3.500 m con un prisma Leica, modelo GPR1. A todos los datos obtenidos le fueron aplicadas las correcciones por efectos de esfericidad y refracción. Los puntos de referencia geodésicos fundamentales utilizados tienen la altura referida al nivel medio del mar (m.s.n.m.) y están referenciados a los

vértices geodésicos COLA y LN00 en isla Decepción y al vértice geodésico BEJC en isla Livingston, los detalles de las referencias están de acuerdo a los resultados de Jigena et al. (2014).

| # | STATION | Δn 2014 (m) | σΔn 2014 (m) | # | STATION | Δn 2014 (m) | σΔn 2014 (m) | # | STATION | Δn 2014 (m) | σΔn 2014 (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | **LN00** | **0.000** | **0.008** | 23 | **LN108** | 0.266 | 0.000 | 45 | **LN302** | 19.817 | 0.050 |
| 2 | **BEGC** | 57.025 | 0.003 | 24 | **LN109** | 3.758 | 0.004 | 46 | **LN303** | -0.109 | 0.034 |
| 3 | **BALL** | 0.723 | 0.026 | 25 | **LN110** | 20.362 | 0.003 | 47 | **LN401** | 4.645 | 0.003 |
| 4 | **FUMA** | -2.771 | 0.007 | 26 | **LN111** | 24.279 | 0.001 | 48 | **LN402** | 12.409 | -0.013 |
| 5 | **PEND** | 3.562 | 0.038 | 27 | **LN112** | 10.539 | 0.009 | 49 | **LN403** | 20.640 | -0.020 |
| 6 | **COLA** | 22.847 | 0.010 | 28 | **LN113** | -1.488 | 0.004 | 50 | **LN404** | 32.454 | -0.012 |
| 7 | **GLAN** | 2.213 | 0.033 | 29 | **LN114** | -4.002 | 0.008 | 51 | **LN501** | -2.270 | 0.074 |
| 8 | **GEOD** | 17.018 | 0.014 | 30 | **LN115** | -4.655 | 0.011 | 52 | **LN502** | 19.396 | 0.056 |
| 9 | **UCA1** | 3.513 | 0.032 | 31 | **LN116** | -3.804 | 0.011 | 53 | **LN503** | 26.238 | 0.061 |
| 10 | **CR70** | -1.531 | 0.042 | 32 | **LN117** | -3.74 | 0.012 | 54 | **BR-01** | 17.059 | 0.031 |
| 11 | **TELE** | -1.394 | 0.068 | 33 | **LN118** | -2.082 | 0.012 | 55 | **LN601** | -4.347 | 0.054 |
| 12 | **BOMB** | -1.353 | 0.020 | 34 | **LN119** | -1.94 | 0.020 | 56 | **LN602** | 1.785 | 0.050 |
| 13 | **GRAV** | 23.456 | 0.000 | 35 | **LN120** | -0.38 | 0.020 | 57 | **LN603** | 8.617 | 0.043 |
| 14 | **BARG** | -2.883 | 0.008 | 36 | **LN121** | 2.949 | 0.018 | 58 | **LN604** | -3.911 | 0.046 |
| 15 | **TOCO** | -3.640 | 0.008 | 37 | **LN122** | 5.776 | 0.018 | 59 | **LN605** | 3.668 | 0.048 |
| 16 | **LN101** | 2.136 | 0.003 | 38 | **LN123** | 12.02 | 0.013 | 60 | **LN606** | 7.238 | 0.053 |
| 17 | **LN102** | 8.606 | 0.004 | 39 | **LN124** | 0.051 | 0.008 | 61 | **LN607** | 12.875 | 0.074 |
| 18 | **LN103** | -0.756 | 0.008 | 40 | **LN125** | -4.123 | 0.002 | 62 | **LN608** | 1.995 | 0.070 |
| 19 | **LN104** | -3.485 | 0.014 | 41 | **LN201** | 17.845 | 0.009 | | | | |
| 20 | **LN105** | 4.960 | 0.009 | 42 | **LN202** | 6.567 | 0.011 | **201** | **BEJC** | **0.000** | **0.000** |
| 21 | **LN106** | 1.167 | 0.006 | 43 | **LN203** | 12.550 | 0.022 | 202 | **BEJ1** | 1.025 | 0.002 |
| 22 | **LN107** | 2.843 | 0.007 | 44 | **LN301** | 5.757 | 0.046 | 203 | **TOJO** | -9.482 | 0.000 |

**Tabla 2.2:** Puntos de la red RENID y los errores estimados en la nivelación geométrica

En isla Decepción, la altura ortométrica obtenida para el vértice COLA fue trasladada mediante nivelación geométrica hasta la marca geodésica LN00, obteniendo un valor de 6.200 m.s.n.m., con un error de cierre de 13,0 mm sobre una distancia total de nivelación de 7,209 kilómetros, que corresponde a Segundo Orden Geodésico.

| LINKAGE | POINT | LEVELLING DIFFERENCE (m) | LEVELLING ERROR (m) | ELEVATION (m.a.m.s.l.) | LEVELLING TYPE |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | **LN000** | 0.000 | | 6.200 | |
| | **TOCO** | -3.640 | 0.0076 | 2.560 | **GEOM** |
| | **COLA** | 26.487 | 0.0103 | 29.047 | **GEOM** |
| 2 | **COLA** | 0.000 | | 29.047 | |
| | **LN604** | -26.758 | 0.023 | 2.289 | **TRIG** |
| | **BR01** | 20.970 | 0.008 | 23.259 | **GEOM** |
| | **COLA** | 5.788 | 0.022 | 29.047 | **TRIG** |
| 3 | **LN125** | 0.000 | | 2.077 | |
| | **UCA1** | 7.636 | 0.011 | 9.713 | **TRIG** |
| 4 | **UCA1** | 0.000 | | 9.713 | |
| | **TELE** | -4.907 | 0.071 | 4.806 | **TRIG** |
| 5 | **TELE** | 0.000 | | 4.806 | |
| | **BOMB** | 0.041 | 0.021 | 4.847 | **TRIG** |
| 6 | **BOMB** | 0.000 | | 4.847 | |
| | **CR70** | -0.178 | 0.022 | 4.669 | **TRIG** |
| 7 | **CR70** | 0.000 | | 4.669 | |
| | **PEND** | 5.141 | 0.071 | 9.810 | **TRIG** |

**Tabla 2.3:** Elevaciones y diferencias de nivel entre los enlaces de la red RENID.

El punto geodésico LN00 ha quedado definido como Punto Fundamental de Referencia Altimétrica de la Red de Nivelación REGID. En la Tabla 2.2 se muestran los valores de nivelación obtenidos y sus errores asociados.

La red REGID cuenta con circuitos de nivelación independientes. La cota altimétrica de los puntos se obtuvo por nivelación geométrica. Los enlaces entre las líneas de nivelación se realizaron mediante nivelación trigonométrica, a excepción del enlace entre COLA y LN000 que fue realizado por nivelación geométrica. Los resultados se muestran en la Tabla 2.3 y en la Fig. 2.15 se muestra la ubicación de los enlaces y el tipo de nivelación realizado en cada uno.

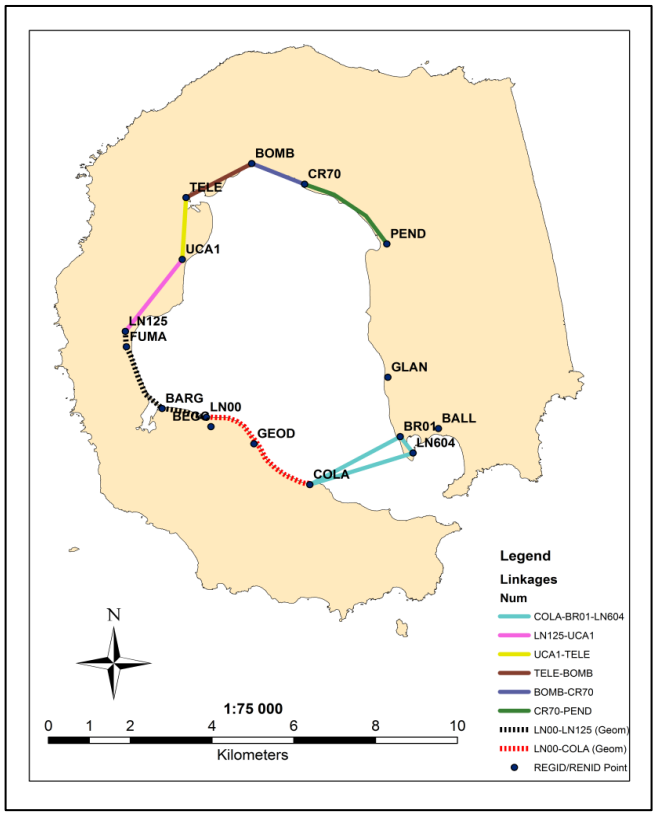



**Figura 2.12:** Enlaces entre las líneas de nivelación de la red RENID

Los 48 puntos de la red RENID fueron colocados sobre bloques de hormigón o sobre roca volcánica, dependiendo de la situación. Los puntos monumentados sobre los bloques de hormigón se realizaron de acuerdo a lo mostrado en la Fig. 2.13, pero con diferente tamaño que para estos casos fue de 30 x 30 centímetros. La marca de nivelación colocada sobre roca volcánica se construyó colocando un bloque de resina epoxi, de 12 x 14 cm, nivelado y fijado sobre la roca mediante un tornillo de acero inoxidable de altura variable, consolidado con soldadura-pegamento epoxi. El punto de referencia vertical está físicamente materializado en la parte superior de la tuerca que fija el tornillo, ver Fig. 2.16.

**Figura 2.13:** Red RENID, marcas de nivelación empotradas sobre roca volcánica

### *2.3.4. Red Gravimétrica de isla Decepción, REGRID.*

| # | STATION | GRAVITY (mGal) | σ G (mGal) | # | STATION | GRAVITY (mGal) | σ G (mGal) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | **LN00** | **982206.408** | 0.051 | 32 | **LN118** | 982204.907 | 0.077 |
| 2 | **BEGC** | 982196.927 | 0.021 | 33 | **LN119** | 982204.957 | 0.092 |
| 3 | **BALL** | 982204.414 | 0.027 | 34 | **LN120** | 982204.608 | 0.094 |
| 4 | **FUMA** | 982204.912 | 0.026 | 35 | **LN121** | 982204.254 | 0.092 |
| 5 | **PEND** | 982202.237 | 0.022 | 36 | **LN122** | 982204.026 | 0.086 |
| 6 | **COLA** | 982205.580 | 0.035 | 37 | **LN123** | 982203.253 | 0.075 |
| 7 | **GLAN** | 982201.404 | 0.040 | 38 | **LN124** | 982204.803 | 0.058 |
| 8 | **GEOD** | 982203.666 | 0.028 | 39 | **LN125** | 982205.356 | 0.087 |
| 9 | **UCA1** | 982201.949 | 0.029 | 40 | **LN201** | 982200.860 | 0.078 |
| 10 | **CR70** | 982201.672 | 0.032 | 41 | **LN202** | 982202.898 | 0.078 |
| 11 | **TELE** | 982204.877 | 0.034 | 42 | **LN203** | 982202.238 | 0.087 |
| 12 | **BOMB** | 982204.710 | 0.038 | 43 | **LN301** | 982200.833 | 0.056 |
| 13 | **GRAV** | 982202.545 | 0.006 | 44 | **LN302** | 982199.515 | 0.061 |
| 14 | **BARG** | 982206.942 | 0.018 | 45 | **LN303** | 982202.097 | 0.051 |
| 15 | **LN101** | 982205.937 | 0.059 | 46 | **LN401** | 982206.461 | 0.053 |
| 16 | **LN102** | 982204.751 | 0.052 | 47 | **LN402** | 982205.851 | 0.064 |
| 17 | **LN103** | 982206.520 | 0.058 | 48 | **LN403** | 982204.553 | 0.065 |
| 18 | **LN104** | 982207.415 | 0.077 | 49 | **LN404** | 982202.775 | 0.054 |
| 19 | **LN105** | 982206.059 | 0.089 | 50 | **LN501** | 982203.602 | 0.071 |
| 20 | **LN106** | 982207.936 | 0.096 | 51 | **LN502** | 982200.069 | 0.075 |
| 21 | **LN107** | 982205.767 | 0.100 | 52 | **LN503** | 982198.328 | 0.057 |
| 22 | **LN108** | 982206.612 | 0.102 | 53 | **BR-01** | 982200.614 | 0.053 |
| 23 | **LN109** | 982205.950 | 0.100 | 54 | **LN601** | 982205.191 | 0.049 |
| 24 | **LN110** | 982203.095 | 0.096 | 55 | **LN602** | 982204.490 | 0.051 |
| 25 | **LN111** | 982202.109 | 0.089 | 56 | **LN603** | 982203.097 | 0.052 |
| 26 | **LN112** | 982204.271 | 0.077 | 57 | **LN604** | 982205.008 | 0.050 |
| 27 | **LN113** | 982206.870 | 0.059 | 58 | **LN605** | 982202.019 | 0.066 |
| 28 | **LN114** | 982206.167 | 0.053 | 59 | **LN606** | 982202.965 | 0.068 |
| 29 | **LN115** | 982206.008 | 0.061 | 60 | **LN607** | 982200.233 | 0.050 |
| 30 | **LN116** | 982205.614 | 0.054 | 61 | **LN608** | 982201.389 | 0.061 |
| 31 | **LN117** | 982205.665 | 0.060 | 62 | **TOCO** | 982205.580 | 0.006 |

**Tabla 2.4:** Red gravimétrica REGRID. Medidas gravimétricas y sus errores asociados.

Para complementar las redes REGID y RENID en cuanto al seguimiento de la deformación vertical de la isla, durante la campaña antártica 2002-03 se estableció la red gravimétrica REGRID. Para esta red, se tomaron como puntos para las observaciones gravimétricas, las 12 estaciones geodésicas de la red REGID y las 48 marcas de nivelación de la red RENID. Estos vértices y marcas constituyen el marco de referencia geográfico para medidas de gravedad y estudio de las anomalías gravimétricas. Esta red, dispone además del pilar gravimétrico situado en el sótano de la antigua Base Argentina y de la nueva Base Gravimétrica

de isla Decepción, el vértice GRAV, que está ubicado en las inmediaciones de la BAE Gabriel de Castilla y constituye el Punto Fundamental de la red gravimétrica REGRID. El otro Punto Fundamental de gravimetría se encuentra en isla Livingston, es el vértice geodésico BEJC, ubicado en la BAE Juan Carlos I. Las medidas se obtuvieron con un gravímetro relativo Lacoste Romberg, modelo D-203, que tiene una precisión de lectura de ± 0,01 mGal y una deriva estática menor a 1 mGal / mes (Berrocoso et al. 2008). Todos los datos gravimétricos fueron corregidos por marea, altura y deriva, los resultados se muestran en la Tabla 2.4.

El enlace gravimétrico entre el continente sudamericano y las islas Shetland del Sur se hizo desde la Base Gravimétrica APPA (Punta Arenas, Chile), perteneciente a la Red Chilena de Gravimetría, hasta la estación geodésica BEJC (isla Livingston), y a partir de allí se realizó la conexión con el vértice GRAV (isla Decepción). El cierre gravimétrico se realizó al finalizar la Campaña Antártica y de retorno al continente sudamericano. El valor de la gravedad en la Base Gravimétrica APPA es 981320.810 mGal. Las alturas ortométrica (H) fueron calculadas según (Heiskanen &Moritz 1985, Berrocoso et al. 1996) utilizando la altura elipsoidal (h), obtenida a partir de las mediciones GPS, además de medidas absolutas de la gravedad (g) y las diferencias de nivel ($\Delta n$).

Las medidas del nivel del mar fueron vinculados a los puntos fijos de referencia en tierra, TGBM, mediante la comparación de lecturas simultáneas de nivelación geométrica realizadas con un de nivel óptico (Nivel Leica NA2). La lectura fue realizada entre el sensor de presión colocado en una regla respecto a otra regla de nivelación colocada sobre la referencia altimétrica del TGBM, de cota altimétrica conocida. Se calcularon las alturas de los TGBMs respecto a las estaciones geodésicas cercanas de la red REGID, utilizando los vértices COLA y LN000 en isla Decepción y BEJC en isla Livingston.

### *2.3.5. Establecimiento de puntos gravimétricos auxiliares de la red REGRID.*

Debido a las condiciones geográficas y topográficas adversas de isla Decepción, con glaciares cerca de la costa y la parte exterior bastante inaccesible, ha obligado que el diseño y establecimiento de las redes sea alrededor de la bahía interior (Puerto Foster) y a no más de un kilómetro desde la línea de costa interior. Con la finalidad de poder propagar y densificar las mediciones gravimétricas hacia el exterior de la isla, se establecieron 46 puntos auxiliares, los mismos fueron dotados con coordenadas geodésicas, obtenidas por observaciones GPS, datos de gravedad absoluta y nivelación. Los puntos auxiliares fueron posicionados en modo fast-static, mediante un receptor GPS Trimble, modelo 5700 de doble frecuencia. La cota nivelación fue trasladada desde puntos de altura conocida perteneciente a la red REGID o RENID. El traslado de la cota se realizó mediante métodos de taquimetría electrónica, utilizando una estación total Leica, modelo TPS-403. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 2.5 y la ubicación de los puntos de la REGRID podemos verla en la Fig. 2.17.

| # | PUNTOS | Lat S (° ' ") | Long W (° ' ") | h (m) | G | σG | # | PUNTOS | Lat S (° ' ") | Long W (° ' ") | h (m) | G | σG |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | EG01 | 62 58 48.1094 | 60 40 12.3818 | 78.456 | 982198.173 | 0.055 | 24 | G18 | 62 58 40.1888 | 60 40 45.1809 | 51.776 | 982202.092 | 0.052 |
| 2 | EG02 | 62 59 01.2970 | 60 39 11.4625 | 71.178 | 982199.122 | 0.066 | 25 | G19 | 62 58 44.8427 | 60 41 29.3256 | 97.453 | 982194.442 | 0.064 |
| 3 | EG03 | 62 59 30.2762 | 60 37 21.8428 | 52.532 | 982205.529 | 0.057 | 26 | G20 | 62 58 38.3412 | 60 42 52.5674 | 58.462 | 982200.199 | 0.054 |
| 4 | EG05 | 62 59 53.8791 | 60 34 47.5026 | 20.146 | 982209.584 | 0.053 | 27 | G21 | 62 58 39.2400 | 60 43 05.2908 | 80.672 | 982196.137 | 0.065 |
| 5 | EG06 | 62 58 37.6953 | 60 41 07.9465 | 39.988 | 982204.119 | 0.053 | 28 | G22 | 62 58 44.3870 | 60 43 06.3874 | 60.864 | 982199.178 | 0.065 |
| 6 | EG07 | 62 58 43.2210 | 60 42 50.4931 | 69.735 | 982197.927 | 0.053 | 29 | G26 | 62 57 03.9356 | 60 42 29.2077 | 47.694 | 982201.559 | 0.065 |
| 7 | EG09 | 62 57 14.5726 | 60 42 26.6680 | 25.443 | 982204.825 | 0.057 | 30 | G27 | 62 57 00.8922 | 60 42 15.8027 | 80.152 | 982195.785 | 0.066 |
| 8 | EG10 | 62 56 31.9871 | 60 41 58.0812 | 52.152 | 982200.187 | 0.062 | 31 | G28 | 62 57 14.9726 | 60 42 09.9771 | 19.951 | 982205.054 | 0.053 |
| 9 | EG11 | 62 55 35.7940 | 60 41 22.7860 | 28.703 | 982204.052 | 0.053 | 32 | G31 | 62 56 24.6032 | 60 41 55.3321 | 69.506 | 982196.543 | 0.062 |
| 10 | EG13 | 62 55 09.7657 | 60 37 45.4645 | 36.295 | 982200.685 | 0.062 | 33 | G32 | 62 56 21.8587 | 60 42 19.3941 | 103.483 | 982191.824 | 0.087 |
| 11 | EG14 | 62 56 07.0910 | 60 35 20.8290 | 50.980 | 982198.213 | 0.071 | 34 | G33 | 62 56 35.4428 | 60 42 35.5984 | 87.088 | 982195.299 | 0.092 |
| 12 | G02 | 62 58 46.7819 | 60 39 38.2754 | 112.127 | 982190.083 | 0.065 | 35 | G34 | 62 56 39.9117 | 60 42 22.1502 | 70.898 | 982197.392 | 0.092 |
| 13 | G03 | 62 59 08.8696 | 60 40 31.9497 | 104.678 | 982195.895 | 0.053 | 36 | G35 | 62 55 42.7556 | 60 41 17.3589 | 23.395 | 982204.237 | 0.049 |
| 14 | G04 | 62 59 14.7016 | 60 39 37.4031 | 82.573 | 982199.635 | 0.065 | 37 | G42 | 62 55 14.9427 | 60 38 32.1780 | 23.961 | 982202.504 | 0.061 |
| 15 | G07 | 62 58 59.4249 | 60 39 39.0242 | 52.816 | 982203.413 | 0.055 | 38 | G43 | 62 55 07.3829 | 60 38 06.7445 | 42.856 | 982199.992 | 0.073 |
| 16 | G09 | 62 59 14.1399 | 60 38 56.6499 | 57.371 | 982202.777 | 0.067 | 39 | G44 | 62 55 02.8139 | 60 37 38.3307 | 63.968 | 982196.250 | 0.077 |
| 17 | G10 | 62 59 10.8655 | 60 38 48.9905 | 35.889 | 982205.576 | 0.057 | 40 | G45 | 62 55 11.1201 | 60 37 23.6366 | 45.943 | 982198.709 | 0.073 |
| 18 | G11 | 62 59 44.1112 | 60 37 08.5360 | 80.317 | 982199.422 | 0.062 | 41 | G48 | 62 56 01.4956 | 60 35 41.7043 | 26.274 | 982202.010 | 0.057 |
| 19 | G12 | 62 59 36.1661 | 60 37 35.4294 | 89.251 | 982201.818 | 0.053 | 42 | G49 | 62 55 44.3922 | 60 36 24.7356 | 24.443 | 982201.488 | 0.055 |
| 20 | G14 | 62 59 45.3668 | 60 35 12.4745 | 27.704 | 982208.779 | 0.053 | 43 | G53 | 62 56 18.9500 | 60 36 03.6615 | 60.691 | 982197.149 | 0.065 |
| 21 | G15 | 62 59 54.2475 | 60 34 22.3007 | 41.089 | 982205.265 | 0.064 | 44 | G55 | 62 56 23.2707 | 60 36 03.9003 | 56.375 | 982198.337 | 0.065 |
| 22 | G16 | 63 0 02.2715 | 60 34 29.7894 | 59.787 | 982201.591 | 0.064 | 45 | G57 | 62 56 54.0885 | 60 36 01.2493 | 18.737 | 982204.579 | 0.053 |
| 23 | G17 | 62 58 38.1730 | 60 41 37.8158 | 80.573 | 982197.149 | 0.064 | 46 | TOCO | 62 59 26.3322 | 60 37 34.0251 | 21.563 | 982205.580 | 0.011 |

**Tabla 2.5:** Red REGRID, puntos auxiliares

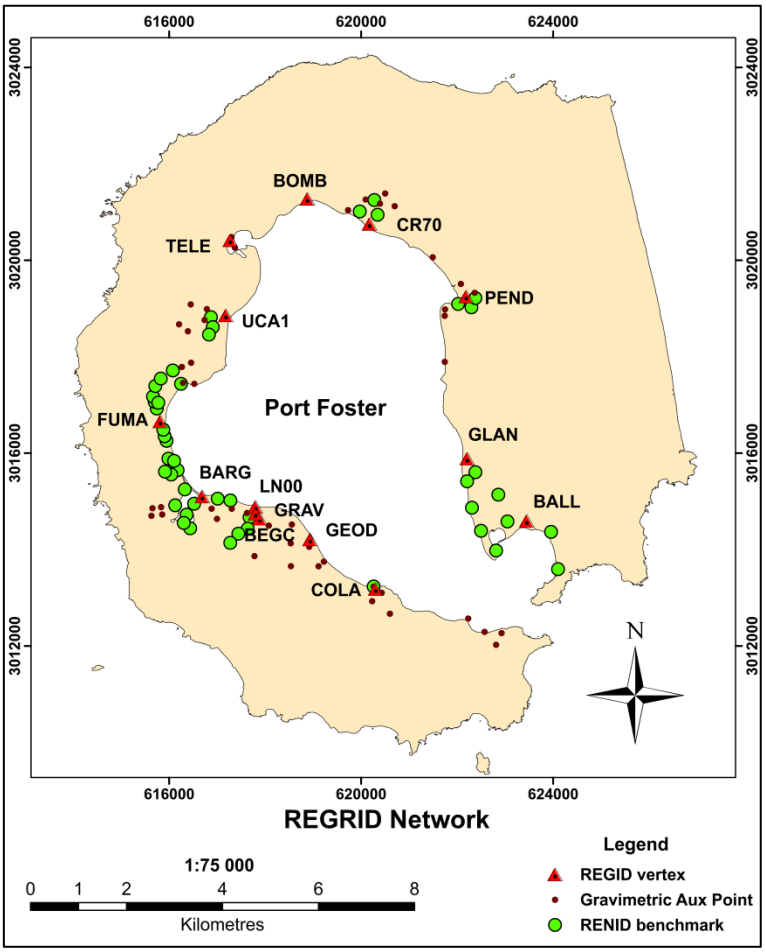



**Figura 2.14:** Red gravimétrica REGRID

## 2.4. Marco oceanográfico.

El marco oceanográfico de nuestra área de estudio está definido por las estaciones mareográficas, puntos de control de mareógrafos (TGBM), puntos auxiliares de referencia de mareógrafos (TGAR, en ingles:Tide Gauge Auxiliary Reference) y los vértices de referencia vinculados a las estaciones mareográficas.

### *2.4.1. Estaciones mareográficas.*

En las islas Livingston y Decepción se instalaron dos estaciones mareográficas en puntos cercanos a la costa, denominadas LIVMAR y DECMAR. La estación LIVMAR se encuentra instalada en caleta Johnson, que es una pequeña cala semi-cerrada y de poca profundidad, situada en el sur de la isla Livingston, cerca de la BAE Juan Carlos I. La estación DECMAR se encuentra ubicada en punta Colatinas a unos 3 km al sur de la BAE Gabriel de Castilla y más o menos a la misma distancia de los Fuelles de Neptuno.

### *2.4.2. Puntos de Control de Mareógrafos (TGBM) y Puntos Auxiliares de Referencia de Mareógrafos (TGAR)*

Para el control vertical de los datos de marea, estos fueron referidos altimétricamente a un TGBM que a su vez está enlazado con otras marcas auxiliares (TGAR). En la Tabla 2.6 se presentan los TGBM y TGAR que corresponden a cada estación mareográfica.

| Est. Marea | Vertice GPS | TGBM | TGAR |
|---|---|---|---|
| **LIVMAR** | BEJ1 | TOJO | CIJO |
| **DECMAR** | COLA | TOCO | CINF, CSUP |

**Tabla 2.6:** Estaciones mareográficas y sus correspondientes vértices geodésicos, TGBM y TGAR.

Los TGBM son marcas geodésicas que están dotadas de coordenadas geodésicas ($\varphi$, $\lambda$, h), altura ortométrica (H) y ondulación del geoide (N). Se encuentran monumentados sobre roca mediante un tornillo de acero inoxidable donde se asegura la antena GPS.

Los TGAR son marcas de nivelación, en principio solo están dotados con cota altimétrica y físicamente están definidos por un clavo de acero inoxidable incrustado en la roca. Se encuentran enlazados con los TGBM mediante nivelación geométrica. Estas marcas sirven para recuperar la cota altimétrica del TGBM correspondiente en caso de pérdida o destrucción.

Los TGBM y TGAR fueron ubicados en puntos cercanos a los lugares donde fueron fondeados los sensores de marea y muy próximos a vértices de la red REGID y/o RENID, a los cuales fueron vinculados altimétricamente mediante nivelación geométrica. En la Fig. 2.1 se muestra la ubicación de las estaciones mareográficas en el área de estudio, con sus respectivos TGBM

Los TGBM y TGAR fueron ubicados sobre una roca de fácil visualización y muy próximo al sitio de fondeo de los mareógrafos, cuidando que la ubicación física de la marca geodésica (tornillo/clavo) se encuentre siempre por encima del nivel de la pleamar, de acuerdo a los especificado en (UNESCO 1994) y a lo realizado en los trabajos de Vidal et al. (2012) y Jigena et al. (2014). En la Fig. 2.18 se muestran los detalles de la ubicación de los TGBM y TGAR en las estaciones de LIVMAR (a) y DECMAR (b).

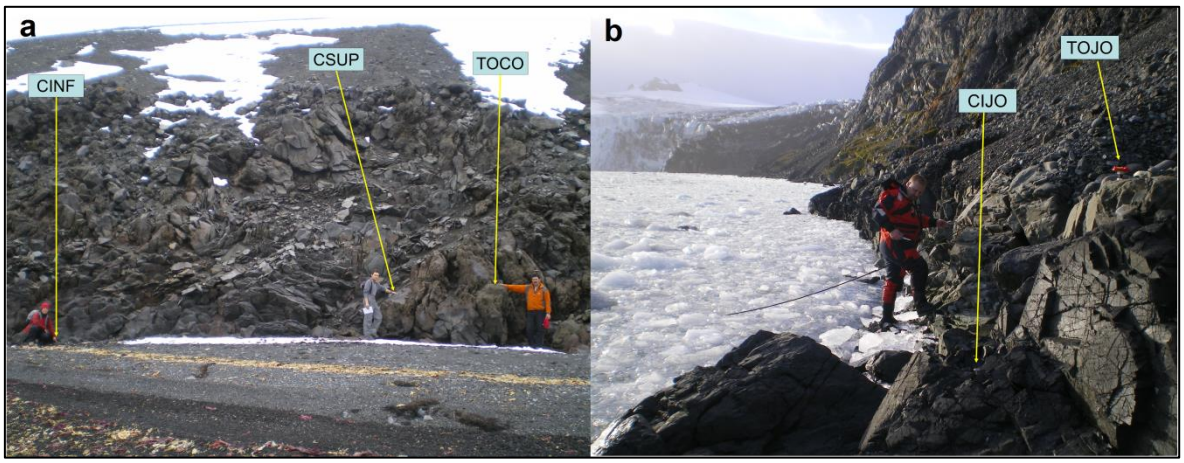



**Figure 2.18:** Ubicación de TGBM y TGAR. **a.** Estación DECMAR . **b.** Estación LIVMAR

Cada TGBM se encuentra vinculado al menos a dos marcas auxiliares TGAR, definido como la marca auxiliar de referencia vertical o marca de seguridad para la recuperación de la cota altimétrica en caso de una posible destrucción o pérdida de la referencia principal TGBM. Toda la vinculación altimétrica se ha realizado mediante nivelación geométrica de primer orden geodésico con la ayuda de nivel óptico Wild (Leica) modelo NA2, cuya precisión es de 0.7 ppm por cada kilómetro de doble nivelación. Los TGBM fueron posteriormente vinculados a puntos de las redes geodésicas REGID y/o RENID, tanto en vertical como en horizontal.

## Capítulo 3

# Determinación del nivel medio del mar

### 3.1. Antecedentes de trabajos en la zona.

Las observaciones de marea en la Antártida son muy escasas y la mayoría corresponden a registros de la temporada del verano austral, debido a las duras condiciones climáticas de la Antártida durante el resto del año donde normalmente las aguas de las zonas costeras permanecen congeladas hasta el inicio del verano (Dragani et al. 2004). En la mayoría de los trabajos realizados hasta la fecha los datos han sido tomados en temporada de verano y no se conocen datos de marea que tengan de una serie completa de al menos un año de duración, contando hasta la fecha, con muy pocas series de marea con registros suficientes que permitan obtener las principales constituyentes de marea (SCAR 1993, King & Padman 2005). Hasta la fecha, para muchos estudios geofísicos y oceanográficos se han utilizado datos obtenidos indirectamente, como las cartas co-tidales, cartas de iso-amplitud y datos de altimetría por satélites. Es muy importante obtener una serie de mareas en base a medidas directas, pues nos permite estudiar la propagación y características de la onda con datos reales en el entorno de la estación, y además extrapolar estos resultados a lugares próximos.

Las primeras observaciones registradas de los niveles del mar en la isla Decepción fueron realizadas por el SHN en 1970, los datos de marea se obtuvieron durante cinco días en verano (13 al 17 de diciembre de 1970) mediante una regla de marea instalada cerca de la BAE Decepción (SHN 1970). También podemos ver un histórico de los registros de marea en esta área en los trabajos de (Dragani et al. 2004, Vidal et al 2012, Jigena et al. 2014). Con los datos de marea del SHN se obtuvo el primer datum vertical referido al vértice geodésico BARG (Base Argentina), perteneciente a la Red Geodésica Isla Decepción (REGID), que fue utilizado como referencia vertical y horizontal durante varios años, cuyo valor determinado de la cota de nivelación fue de 2,55 m.s.n.m . Este datum vertical fue trasladado mediante nivelación geométrica de primer orden geodésico hasta el punto LN00, utilizado como referencia vertical de red RENID, a partir del año 2003 (Berrocoso et al. 2006a, 2006b, 2007, Jigena et al. 2014), cuyo valor calculado de la cota de nivelación fue de 5.43 m.s.n.m. Hay que hacer notar que este primer datum no fue corregido por efectos gravimétricos.

Varios autores utilizaron estaciones hidrográficas y correntómetros para estimar la circulación y el transporte en la cuenca oriental del Estrecho de Bransfield (López et al. 1993, 1994, 1999, Speroni et al., 2000, D'onofrio et al. 2003, Dragani et al. 2004). Además de los datos hidrográficos y de corrientes se fondearon una serie de mareógrafos tipo Aanderaa,

equipados con registradores de presión para obtener los niveles de marea, estos mareógrafos se fondearon en las islas Low, Rey Jorge y Livingston. En este estudio se puso mucho énfasis en el análisis del carácter de las mareas, de las corrientes y la importancia relativa de flujo de las mareas en la hidrodinámica general de circulación en el estrecho de Bransfield, determinándose que las mareas en el Estrecho de Bransfield tienen una combinación de frecuencias diurnas y semidiurnas, donde las componentes principales de mareas son O1 (0.0387 cph, ciclos por hora), K1 (0.0418 cph), M2 (0.0805 cph) y S2 (0.0833 cph). Estos autores, también observaron que las mareas varían de diurna a semidiurnas en período quincenal, con rangos máximos de marea entre 1.7 m y 2.1 m. De estas tres estaciones, la única que se encuentra en nuestra área de estudio es Isla Livingston (62°30' S, 60°23' W) y tiene un nivel máximo de variación de 1.98 m, donde la componente M2 es la más importante, con una amplitud de 0,39 m y un retardo de fase de 277 °. Las componentes K1, O1 y S2 presentan amplitudes similares, de alrededor de 0,28 m.

En base a los estudios de los niveles medios del mar en las islas Low, Rey Jorge y Livingston, García (1994) demostró que la propagación de la onda M2 es perpendicular a la dirección del estrecho de Bransfield, mientras que las ondas diurnas viajan longitudinalmente hacia el sur-oeste a lo largo de la costa, con dirección NE-SW.

Una descripción detallada de la propagación y amplificación de la marea en el lado norte de la Península Antártica (Estrecho de Gerlache, Estrecho de Bransfield y el noroeste del Mar de Weddell) se da en un estudio realizado por Dragani et al. (2004). Basado en cartas co-tidales y cartas de iso-amplitud, estos autores reportaron las amplitudes y desfases de las principales componentes de marea (M2, S2, O1 y K1) en el Estrecho de Bransfield. Para su estudio utilizaron los resultados del análisis armónico de series de mediciones directas del nivel del mar tomadas de (Speroni et al. 2000, D'onofrio et al. 2003). En el trabajo de Dragani et al. (2004), las estaciones de marea fueron ubicadas en Isla de Livingston (Estación Media Luna, HM) y en Isla Decepción, Caleta Péndulo (Estación Péndulo, PC) y Bahía Balleneros (Estación Balleneros, WB). Los niveles de marea se midieron con un mareógrafo de flotador en la Estación de Media Luna (HM) y con un mareómetro o regla de marea en las estaciones de Caleta Péndulo (PC) y la Bahía Balleneros (WB). Los períodos de tiempo del registro de los datos de marea fueron muy variables: 38 días en HM, 19 días en PC y 12 días en WB.

| Estación | HM | | PC | | WB | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Constante | Amplitud (m) | Fase (G) | Amplitud (m) | Fase (G) | Amplitud (m) | Fase (G) |
| M2 | 0.43 | 281 | 0.46 | 280 | 0.44 | 281 |
| S2 | 0.24 | 335 | 0.28 | - | 0.29 | - |
| O1 | 0.28 | 49 | 0.29 | 55 | 0.29 | 48 |
| K1 | 0.28 | 66 | 0.26 | 73 | 0.26 | 66 |

**Tabla 3.1**: Constantes armónicas de las principales constituyentes de marea, en las estaciones mareográficas HM, PC y WB, según Dragani et. al., 2004

En la Tabla 3.1 se presentan las principales constantes armónicas de marea en estas tres estaciones obtenidas con estos trabajos (Dragani et al. 2004).

Un modelo regional de alta resolución (1/30 ° x 1/60 °) para la región de la Península Antártica y el Mar de Weddell, fue desarrollado por (Padman et al. 2002), que también fue descrito más recientemente por (Willmott et al. 2007). A partir de este modelo, es posible estimar las principales componentes de marea para la zona. El modelo calcula las principales constituyentes armónicas de marea en las islas y en los pasos estrechos alrededor de la Península Antártica. Los resultados de este estudio se muestran en Padman et al. (2002) y fueron realizados tomando como modelo de calibración los valores obtenidos en la estación mareográfica PTC_4_2_33, instalada en la zona pelágica al norte de la isla Rey Jorge ( $\varphi$ = 62.13º N, $\lambda$ = 60.68º W), trabajo que se detalla en Smithson et al. (1992).

También se estudiaron los registros de marea obtenidos en la BAA Jubany, en la isla Rey Jorge (Schöne et al. 1998). Estos autores presentan el análisis armónico de dos series temporales de registros de mareas correspondientes a los períodos comprendidos entre febrero y diciembre de 1996 y de marzo a diciembre de 1997, con un total de 12 componentes de marea, donde la componente M2 presenta amplitudes de 0.47 - 0.48 m y retardos de fase de 277º a 278°. El factor de forma de la marea (índice de Courtier) es de 0,8 calculado como:

$$F = (K1 + O1) / (M2 + S2) \qquad \text{(Ec. 3.1)}$$

De acuerdo a este índice obtenido, las mareas se definen como mareas mixtas predominantemente semidiurnas, teniendo todos los días dos pleamares y dos bajamares con desigualdades en altura y tiempo, coincidiendo por lo definido por (Defant 1961, Schöne et al. 1998). La amplitud media de la marea viva, calculada como 2 (M2 + S2), es de 1.48 m.

Desde la Campaña Antártica Española 2007-2008, concretamente diciembre de 2007, el Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía de la Universidad de Cádiz (LAGC-UCA) está realizando observaciones de marea en las Islas Decepción y Livingston (Antártida). Se instalaron dos estaciones mareográficas denominadas LIVMAR, instalada en Caleta Johnson, Isla Livingston y DECMAR, instalada en Punta Colatinas, Isla Decepción. Las estaciones están equipadas con sensores de presión que fueron fondeados en puntos cercanos a la costa y próximos a las Bases Antárticas Españolas "Juan Carlos I" y "Gabriel de Castilla", respectivamente (Vidal et al. 2012). Durante esa campaña se obtuvieron registros continuos de 81 días de observación (diciembre-2008 hasta marzo-2008), que fueron las primeras series de marea para estas estaciones y con las cuales se calcularon las primeras constituyentes de marea para las Islas Decepción y Livingston con datos obtenidos *"in situ"* y con más de un mes de observaciones continuas. Se obtuvieron los valores de amplitud y desfase para nueve componentes M2, S2, N2, K2, O1, P1, K1, Mm y MSf (Vidal et al. 2011, 2012). Los resultados son similares en amplitud a los obtenidos por (Dragani et al. 2004), pero respecto al desfase hay diferencias considerables sobretodo en la componente K1. El coeficiente de forma

obtenido fue de 0,86 para DECMAR y 0.80 para LIVMAR, que determina el mismo régimen definido anteriormente por (Defant 1961, Dragani et al. 2004). Con estos registros de marea se calcularon los primeros niveles medios del mar en las estaciones LIVMAR y DECMAR referenciados altimétricamente respecto a vértices pertenecientes a la redes geodésicas REGID y RGAE (Vidal et al. 2012, Jigena et al. 2014).

En las sucesivas campañas hidrográficas se continuaron las observaciones durante el período estival, pero es partir de Febrero de 2011 que se obtuvieron series temporales continuas con más de dos años de observación (798 días) en ambas estaciones, correspondientes a las campañas antárticas 2010-11, 2011-12 y 2012-13. Los resultados de estas nuevas observaciones de marea constituyen las primeras series de marea continuas en la Antártida, cuyos resultados pueden ser válidos para las Islas Shetland del Sur y el Estrecho de Bransfield, tomando como referencia las islas Livingston y Decepción. (Jigena et. al., 2014), siendo los mismos parte de la presente Tesis Doctoral.

## 3.2. Instrumentación, datos y metodología.

### *3.2.1. Equipos utilizados para toma de datos de marea*

Los datos fueron obtenidos mediante sensores de presión, utilizando como referencia sensores de presión SAIV modelo TD304, con sensores adicionales de temperatura y conductividad que tienen una precisión de ± 0,01% del fondo de escala en la medida de la presión por cada 10 m, es decir, una precisión de 1 mm. Los datos de presión, temperatura y conductividad se registraron en las estaciones por medio de un sensor CTD 204 SAIV SD que tiene una precisión de ± 0,02 ppt en salinidad (para conductividad) y ± 0,01 º C para la temperatura. También se utilizaron sensores AQUAlogger PT520 de temperatura y de presión, que tienen una precisión de ± 0,05 º C en temperatura y de 0,005% a escala completa para cada 10 m, en presión. Con estos datos se obtuvieron mediciones instantáneas del nivel del mar.

Las observaciones GPS fueron realizadas con receptores GPS Leica modelo GX1230, de doble frecuencia, 14 canales y con antena AT 1202 GG, que tiene una precisión para levantamientos estáticos en modo diferencial de 5 mm + 0.5 ppm en horizontal y 10 mm + 0.5 ppm en vertical.

La nivelación geométrica fue realizada utilizando un nivel óptico Leica modelo NA2 cuyo error es de ± 0.7 mm en un kilómetro de doble nivelación.

Las observaciones gravimétricas se realizaron con un gravímetro relativo LaCoste & Romberg modelo D-203, que tiene una precisión de lectura de +/- 0.01 mGal y una deriva estática menor que 1 mGal / mes.

### *3.2.2. Fondeo de sensores de presión*

El problema principal de instalación de estaciones mareográficas en la Antártida, son las extremas condiciones climatológicas, que tienen como consecuencia el congelamiento de la capa superficial del agua de mar durante el invierno, formando banquisa y placas de hielo que al moverse pueden desplazar el sensor y/o romper los cables y cabos que los aseguran a la costa y con ello perder el equipo y los datos. Por esta razón, hemos diseñado un sistema bastante seguro, que protege tanto a los sensores de presión como a todo el sistema de fondeo, asegurando los lastres de fondeo a tierra y colocando solidario al lastre un tubo de hierro galvanizado, abierto en uno de sus costados, en cuyo interior se coloca el sensor. El lastre de fondeo fue asegurado a las rocas de la orilla, mediante anclajes con cables y cabos de gran resistencia a la tracción, para evitar que se rompan y que el sensor pueda perderse en el fondo (Figs 3.1, 3.2) y de esta manera minimizar los riesgos de desplazamiento. Todo esto con la finalidad de obtener mediciones directas de los niveles de marea con la mayor seguridad y precisión posible y evitar los saltos en la serie temporal provocados por estos desplazamientos.

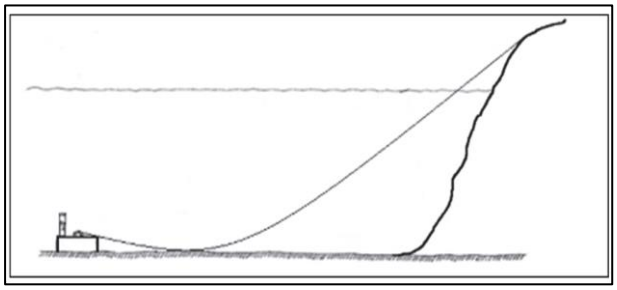


**Figura 3.1:** Sistema de fondeo y anclaje del mareógrafo

Los sensores de presión fueron fondeados a unas profundidades aproximadas de 7.5 y 3.5 metros en LIVMAR y DECMAR respectivamente, en ambos casos cercanos a la costa para minimizar los errores en la posterior referencia al respectivo TGBM ubicado en tierra.

Para el fondeo de los mareógrafos se utilizó como plataforma de trabajo una embarcación neumática Zodiac Pro 500, quedando los fondeos ubicados a unos 30 metros de la línea de playa y entre los 3 y los 9 metros de profundidad, dependiendo de la configuración del fondo en los sitios de fondeo. La Fig. 3.2 muestra la maniobra de fondeo de los mareógrafos.

**Figura 3.2:** Fondeo del sensor de presión principal (PTG) en la estación mareográfica DECMAR

### *3.2.3. Georreferenciación de estaciones*

Para el control vertical, los datos de marea fueron referidos altimétricamente a un TGBM, que a su vez está enlazado con otras marcas auxiliares de referencia de nivel TGAR y con vértice geodésico más cercano, STGPS. Toda la referenciación altimétrica se realizó mediante nivelación geométrica Los valores locales de profundidad promedio en cada una de las estaciones fueron de 3.147 m. en la isla Decepción y 7.475 m. en Livingston.

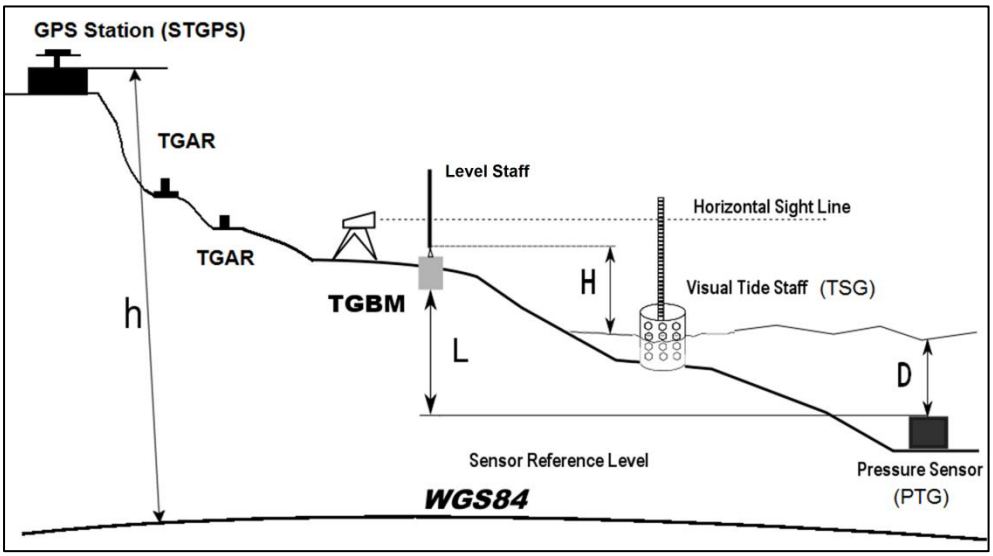



**Figura 3.3:** Referenciación altimétrica de una estación mareográfica. Diagrama de vinculación altimétrica entre los TGBM (marca de referencia de mareógrafo), TGAR (marca auxiliar de referencia) y PTG (sensor principal) para adquisición datos. Figura adaptada de Vidal et al. (2012).

Para obtener los valores medios de profundidad de fondeo de los sensores, las medidas del nivel del mar obtenidas con el Sensor Principal (PTG) se vincularon altimétricamente a un TGBM o TGAR fijo en tierra, mediante un método indirecto, instalando cercano a la zona donde se encuentra fondeado el PTG, otro sensor de presión para control colocado en una regla de nivelación (TSG, Tide Staff Gauge), del cual se conoce su cero o nivel de referencia vertical y cuya parte superior de la regla de nivelación sobresale del agua para poder realizar las lecturas mediante un nivel óptico. Tomando las lecturas simultáneas a la regla de nivelación del sensor de control, TSG y a la regla de marea colocada sobre el TGBM, se realiza la vinculación o enlace altimétrico entre el TSG y el TGBM, obteniendo el desnivel entre ambos y quedando de esta manera las alturas de marea referidas al TGBM, para una mejor comprensión ver Fig. 3.3. Posteriormente, comparamos las lecturas de marea que hemos obtenido de forma simultanea por el TSG, del cual conocemos su profundidad respecto al TGBM, llamada profundidad H y del sensor principal que tenemos fondeado (PTG) llamada profundidad D, que sería nuestra incógnita. Mediante un ajuste lineal obtenemos la profundidad del sensor principal (D), quedando además, todas las lecturas de marea referidas al TGBM (UNESCO 1981, 1988). Resumiendo, este método, lo que se hace es comparar las lecturas simultáneas del nivel de

marea obtenida con el sensor principal PTG, contra sensor de control móvil instalado en la regla de nivelación TSG, que ha sido referenciado mediante nivelación geométrica al TGBM, que se encuentra en tierra. Este procedimiento de referenciación altimétrica fue realizado en ambas estaciones (LIVMAR y DECMAR), además por el método de nivelación geométrica, se realizaron los enlaces entre el STGPS y el TGBM respectivo y desde el TGBM a sus respectivas marcas auxiliares de referencia (TGAR), para más detalles ver Figs 3.3, 3.4 & 3.6.

Para obtener la profundidad de fondeo respecto al TGBM en las estaciones de LIVMAR y DECMAR, se realizó un ajuste lineal entre las alturas instantáneas del nivel del mar medidas por el sensor principal PTG, definida como D, contra las alturas medidas con el sensor de control TSG, definida como H, tomadas simultáneamente y temporalmente sincronizadas. Las mediciones de control, entre PTG y TSG se realizaron en días escogidos, días sin viento y sin olas (mar en calma) tomando las lecturas simultáneas durante 1 hora con una frecuencia (data sampling) de 10 minutos. Para la estación DECMAR, se realizaron medidas durante 7 días obteniéndose 36 medidas distribuidas durante todo el período de registro de la serie. El mismo procedimiento se siguió para LIVMAR, con controles durante dos días con un total de 13 medidas que se realizaron al inicio y al final del período de registro de marea (dos días).

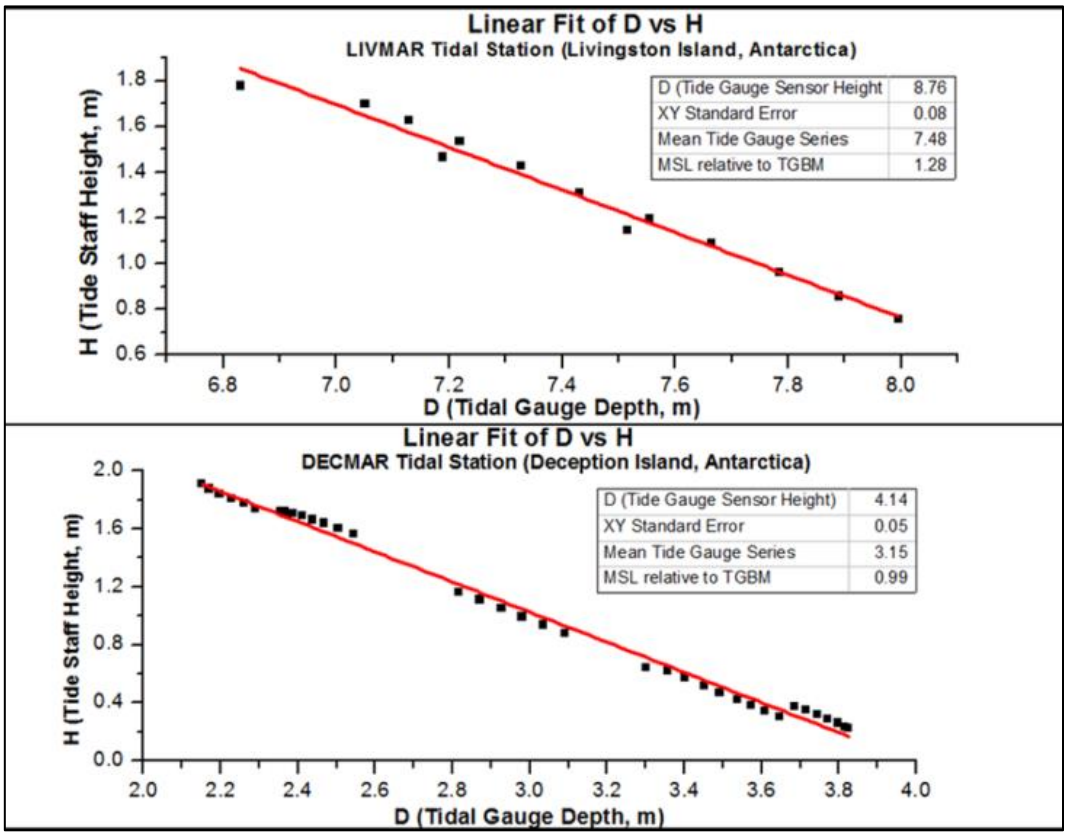



**Figura 3.4:** Ajuste lineal entre las medidas instantáneas del nivel medio del mar

El ajuste lineal entre la presión del sensor principal PTG, transformada a profundidad y corregida por presión atmosférica (D), contra los datos de altura (H) tomados por el sensor de control TSG, instalado en la regla de marea y corregidos por la referencia al TGBM mediante nivelación geométrica. Este ajuste nos proporciona un valor medio del nivel de marea para cada instante de la lectura referido al TGBM y en base a los cuales se corrigen altimétricamente los datos de la serie. La Fig. 3.4 nos muestra los resultados del ajuste lineal realizado.

Este método para control altimétrico de los registros de marea es muy difícil de aplicar de forma continua, debido a que solo puede ser instalado y utilizado durante la época estival puesto que su uso requiere personal técnico para su ejecución; además, el mareógrafo de control TSG se debe quitar durante el invierno para evitar daños o su destrucción por la banquisa o las placas de hielo marino. La Fig. 3.5 nos muestra la instalación y utilización de las reglas de nivelación para el control altimétrico de las alturas de marea.

**Figura 3.5:** Referenciación altimétrica de las medidas de marea.

## 3.3. Determinación de las constituyentes de marea

El período de registro de marea en ambas estaciones está comprendido entre el 3 de febrero de 2011 y el 11 de Abril de 2013. El intervalo de muestreo de los datos fue de 10, 20 y 60 minutos, normalizando para el cálculo y análisis armónico todas las medidas de las series a 60 minutos (1 dato/hora). Se obtuvieron las series temporales respectivas en cada estación que fueron sometidas a un análisis armónico utilizando una aplicación en Matlab desarrollada de acuerdo a (Foreman 1977). Hay que recalcar que esta es la primera vez que se tienen series de marea en la Antártida con más de un año de registro, hasta la fecha los registros de marea se limitaban a la temporada de verano debido a las condiciones extremas durante el resto del año.

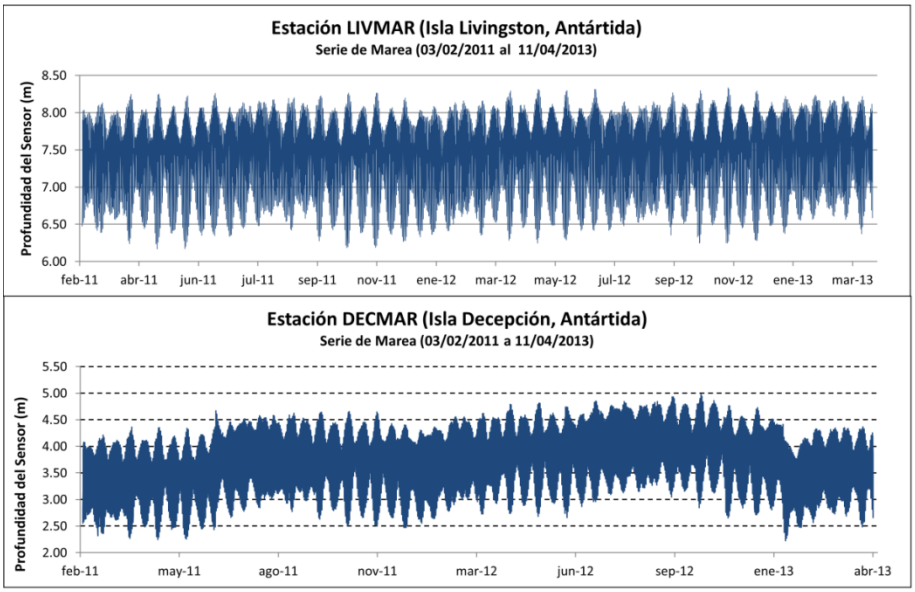



**Figura 3.6:** Series de marea obtenidas en LIVMAR y DECMAR.

Durante todo el período del registro de datos de marea, también se obtuvieron datos meteorológicos de presión atmosférica y temperatura del aire, tomados por la Agencia Española de Meteorología (AEMET), registrados en las estaciones de Gabriel de Castilla (Isla Decepción) y Juan Carlos I (Isla Livingston). La presión atmosférica en la estación de Isla Livingston osciló entre un mínimo de 943,35 mb el 22 de mayo de 2012 y un máximo de 1025, 59 mb el 09 de abril de 2013 y un promedio de 988,27 mb. Para la presión atmosférica, se tomó como serie de referencia, la serie obtenida en Livingston, al ser una serie muy completa y estable, puesto que el registro de la estación Gabriel de Castilla tenía muchos datos faltantes. La Fig. 3.7, presenta la serie de presión atmosférica obtenida en la estación LIVMAR.

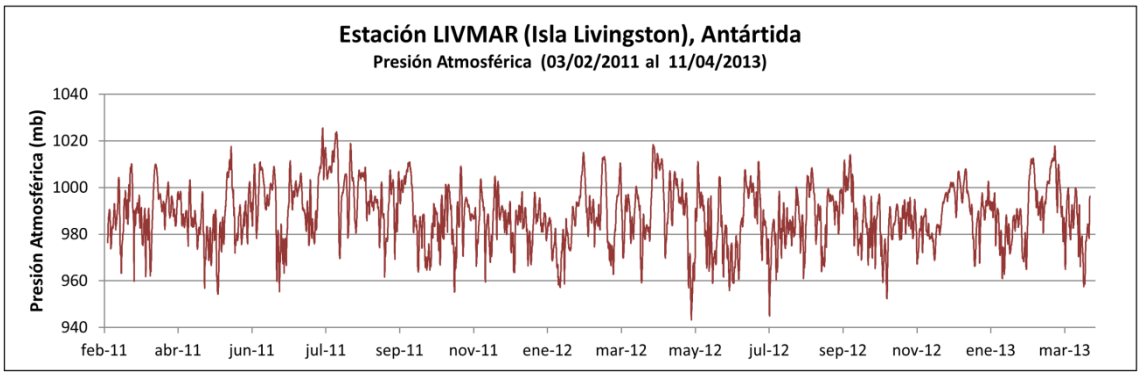



**Figura 3.7:** Serie de presión atmosférica en LIVMAR.

Para convertir la presión hidrostática a una altura equivalente del nivel del mar, usamos:

$$\mathbf{h = (P\text{-}Pa) / \rho g} \qquad \text{(Ec. 3.2)}$$

donde, P es la presión registrada por el sensor del mareógrafo, Pa es la presión atmosférica de referencia (un valor constante, 990.8 mb), g es la aceleración debida a la gravedad cuyo valor medio en Isla Decepción es 9,822956 m/s2 y ρ la densidad del agua en el área de estudio, cuyo valor medio es de 1025 kg/m3, calculado utilizando los registros de temperaturas y salinidades para un valor medio de la zona (UNESCO 1981, Fofonot & Millard 1983). Al valor obtenido se denomina Nivel del Mar Ajustado (NMA). El sensor de presión mide la presión total sin tomar en cuenta los efectos por variaciones de la presión atmosférica , que provocan una variación del nivel del mar, estas fluctuaciones se corrigen mediante el procedimiento conocido como *corrección por efecto de barómetro invertido*, que de forma general consiste en restar un centímetro al nivel del mar por cada milibar de aumento en la presión atmosférica sobre un valor base que comúnmente 1012 mb. Esta variación de la presión atmosférica de referencia es equivalente a mover el nivel de referencia del sensor (Muñoz & Abarca 2009, Álvarez et al. 2003).

Para este trabajo se tomaron registros de presión atmosférica, simultáneos a las medidas de marea, y además se procesaron datos de presión atmosférica desde el 2007 al 2012, obteniendo unos valores medios de 987, 27 mb en Decepción y 988,03mb en Livingston, siendo el valor medio para la zona de 987,65 mb, que no difiere significativamente del valor utilizado por (Vidal et al. 2012, Jigena et al. 2014), que utilizaron como presión atmosférica de referencia un valor constante de 990.8 mb. Este valor corresponde a la presión atmosférica media en la región de la Isla Rey Jorge, BAP Arctowski durante el período 1978-1989 (Rakusa-Suszczewski et al. 1992). Puesto que la discrepancia entre ambos valores es de solo un 0,32% , se ha mantenido el valor inicial para el presente trabajo.

Para obtener el Nivel del Mar Efectivo (NME), para cualquier tiempo en particular, solo tenemos que corregir las lecturas de las mareas ajustadas (NMA), mediante la adición o sustracción de los cambios causados en la presión atmosférica respecto a los valores de referencia. Sabemos que a frecuencia lo suficientemente baja la corrección es aproximadamente igual al descenso de un centímetro (-1.0 cm) en el nivel de la superficie del mar, por cada milibar de aumento (+1 mb) en la presión atmosférica, que es el efecto de barómetro invertido [Chelton & Enfield 1986, Gill

| | Base GdC (mb) | Base JCI (mb) |
|---|---|---|
| **2007** | 990.98 | 990.46 |
| **2008** | 989.88 | 988.24 |
| **2009** | 988.99 | 986.19 |
| **2010** | 986.91 | 986.62 |
| **2011** | 985.43 | 990.21 |
| **2012** | 981.45 | 986.50 |
| **Promedio (mb)** | **987.27** | **988.03** |
| Desv. Estand. (mb) | 3.49 | 1.92 |
| **Promedio Area (mb)** | | **987.65** |

**Tabla 3.2**: Valores medios anuales de presión atmosférica (mb) obtenidos en las estaciones meteorológicas de BAE Juan Carlos I y BAE Gabriel de Castilla. Fuente AEMet

1982, Muñoz & Abarca 2009, Wunsch & Stammer 1997). En Tabla 1 se presentan los valores medios anuales de las observaciones de presión atmosférica obtenidas en las estaciones meteorológicas de la AEmet, en la BAE Juan Carlos I y BAE Gabriel de Castilla.

Se ha realizado el análisis armónico por mínimos cuadrados a los registros de marea, acorde con (Foreman 1977, García et al. 2011, Godin 1972). Las series de marea tienen un total de 19143 datos horarios, que supone un registro de más de dos años de observación (798 días) en ambas estaciones. Los registros tomados corresponden a varias series para la misma estación, siendo seis series para DECMAR y tres series para LIVMAR. Las series, en cada estación, fueron unidas en una sola, realizando la corrección por saltos, debidos principalmente a los cambios de profundidad a las que se fondearon los sensores de presión en cada campaña. Para corregir los saltos, provocados por el cambio de equipos y nuevos fondeos, se ajustan las dos series aplicando el algoritmo de corrección del escalonamiento por elevación de la serie. Una vez corregidos los saltos, se reconstruyen las series completas en ambas estaciones. A las alturas de marea corregidas les aplicamos el análisis armónico para evaluar las amplitudes y el desfase de las componentes, calculadas para la hora UTC, aplicando la corrección nodal, con un intervalo de muestreo de una hora y para un intervalo de confianza del 95%. Para la corrección de las series, hemos utilizado un sensor de referencia. Se trata de un sensor adicional fondeado en las proximidades, cuyos registros se solapan con los de las series anterior y posterior del sensor principal PTG, cuando se realiza el cambio de equipo. El solapamiento entre las series ha sido de al menos dos días.

## 3.4. Resultados y discusión, determinación de las constituyentes de marea

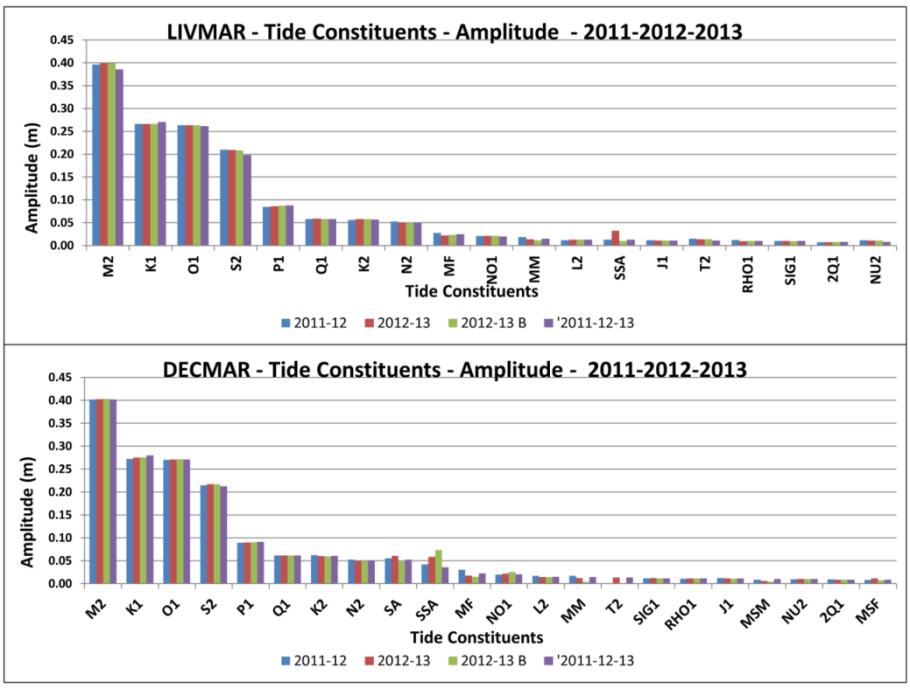



**Figura 3.8**: Amplitud de las principales constituyentes de marea en LIVMAR y DECMAR

En este trabajo se presenta un estudio de los registros de mareas en Decepción y Livingston correspondientes a 798 días de observación continua, lo que ha permitido obtener las constituyentes de marea de corto periodo (diurno y semidiurno) y de largo período (quincenal, mensual, semianual y anual). Estas series de marea corresponden a los datos obtenidos en las estaciones de LIVMAR y DECMAR, en las campañas antárticas 2010-11, 2011-12, 2012-13, en la que además se han tomado datos simultáneos de presión atmosférica para las mismas estaciones. Es destacable el hecho de contar con series temporales de más de un año de duración, pues se constituyen en datos muy valiosos para estudios de la marea en la zona y de la Antártida en general, donde los datos de mareas con series de más de tres meses son escasos.

Los resultados obtenidos en amplitud de las principales componentes de marea en ambas estaciones se muestran en la Fig. 3.8. Se han realizado cuatro análisis para cada estación, tres de ellos para series de un año y el cuarto para la serie completa. En todos podemos observar bastante uniformidad en los resultados obtenidos, que nos muestran la bondad de los mismos. En cuanto al desfase los resultados son similares y se muestran en Fig. 3.9.

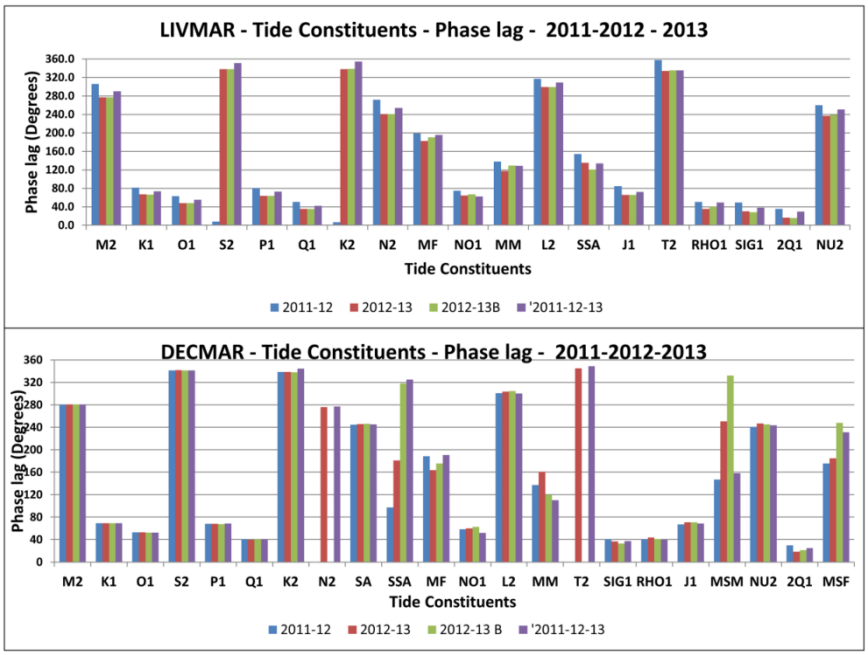



**Figura 3.9:** Desfase de las principales constituyentes de marea en LIVMAR y DECMAR.

En la Tabla 3.2 presentamos los resultados del análisis realizado a la serie completa. Se muestran las diecinueve constituyentes de marea más importantes, cuya amplitud es superior a un centímetro (M2, K1, O1, S2, P1, Q1, K2, N2, NO1, MF, MM, L2, SSA, J1, T2, RHO1, SIG1, 2Q1, NU2) y cuyo aporte de energía es del 93% del total de la onda. En el análisis obtuvimos una condición de matriz de 0.82 y una bondad de ajuste de 0.993. En todos los análisis armónicos realizados, se muestra que la mayor cantidad de energía de la onda de marea (85%) es aportada por ocho componentes, cuatro semidiurnas (M2, S2, K2, N2) y cuatro

componentes diurnas (K1, O1, P1, Q1), con un aporte similar para cada grupo de más o menos un 42,5%.

En lo referente a las amplitudes de las series, los resultados nos muestran que las amplitudes, máxima y mínima, son de 4.986 m. y 2.224 m con un rango de 2.762 m para DECMAR, y de 8.334 m y 6.169 m con un rango de 2.165 m para LIVMAR.

El factor de forma de marea o índice de Courtier obtenido es 0,91 y 0.90 para LIVMAR y DECMAR respectivamente, ha sido calculado de acuerdo a (Ec. 3.1) y nos determina que en el área de estudio las mareas tienen un régimen mixto, con una componente predominantemente semidiurnas (0.25 < C < 1.50 ), teniendo todos los días dos pleamares y dos bajamares, como habían definido (Defant 1961, Dragani et al. 2004).

| Estación DECMAR | | | |
|---|---|---|---|
| | Frecuencia | Amplitud (m) | Desfase (grados) |
| M2 | 0.08051 | 0.40 | 280.5 |
| K1 | 0.04178 | 0.28 | 68.9 |
| O1 | 0.03873 | 0.27 | 52.5 |
| S2 | 0.08333 | 0.21 | 341.2 |
| P1 | 0.04155 | 0.09 | 68.5 |
| K2 | 0.08356 | 0.06 | 338.5 |
| Q1 | 0.03722 | 0.06 | 40.3 |
| N2 | 0.07900 | 0.05 | 245.1 |
| SSA | 0.00023 | 0.04 | 324.9 |
| MF | 0.00305 | 0.02 | 190.4 |
| NO1 | 0.04027 | 0.02 | 51.7 |
| L2 | 0.08202 | 0.01 | 300.2 |
| MM | 0.00151 | 0.01 | 110.3 |
| T2 | 0.08322 | 0.01 | 348.6 |
| SIG1 | 0.03591 | 0.01 | 37.0 |
| RHO1 | 0.03742 | 0.01 | 39.6 |
| J1 | 0.04329 | 0.01 | 68.5 |
| NU2 | 0.07920 | 0.01 | 243.6 |
| 2Q1 | 0.03571 | 0.01 | 25.0 |
| Longitud serie (días) | 797.63 | | |
| Datos Observados | 19143 | | |
| Condición de Matriz | 0.82 | | |
| Ajuste | 0.993 | | |
| Courtier | 0.90 | | |

| Estación LIVMAR | | | |
|---|---|---|---|
| | Frecuencia | Amplitud (m) | Desfase (grados) |
| M2 | 0.08051 | 0.39 | 290.1 |
| K1 | 0.04178 | 0.27 | 73.5 |
| O1 | 0.03873 | 0.26 | 54.9 |
| S2 | 0.08333 | 0.20 | 351.2 |
| P1 | 0.04155 | 0.09 | 73.1 |
| Q1 | 0.03722 | 0.06 | 41.8 |
| K2 | 0.08356 | 0.06 | 354.6 |
| N2 | 0.07900 | 0.05 | 253.8 |
| MF | 0.00305 | 0.02 | 195.5 |
| NO1 | 0.04027 | 0.02 | 62.3 |
| MM | 0.00151 | 0.02 | 128.5 |
| L2 | 0.08202 | 0.01 | 308.9 |
| SSA | 0.00023 | 0.01 | 133.7 |
| J1 | 0.04329 | 0.01 | 71.9 |
| T2 | 0.08322 | 0.01 | 335.4 |
| RHO1 | 0.03742 | 0.01 | 49.4 |
| SIG1 | 0.03591 | 0.01 | 37.9 |
| 2Q1 | 0.03571 | 0.01 | 29.2 |
| NU2 | 0.07920 | 0.01 | 250.6 |
| Longitud serie (días) | 797.63 | | |
| Datos Observados | 19143 | | |
| Condición de Matriz | 0.82 | | |
| Ajuste | 0.993 | | |
| Courtier | 0.91 | | |

**Tabla 3.3:** Principales constituyentes de marea en las estaciones DECMAR y LIVMAR

En general, los resultados en amplitud, desfase y régimen de marea, no difieren significativamente, los resultados obtenidos por (Smithson 1992, SCAR 1993, López et al. 1993, García 1994, Schöne et al. 1998, López et al. 1999, Speroni et al. 2000, Padman et al. 2002, D'onofrio et al. 2003, Dragani et al. 2004, Vidal et al. 2011b, Jigena et al. 2014), sin embargo, se observan variaciones significativas en la constituyente K1 con respecto a los valores dados por (Dragani et al. 2004, Vidal et al. 2011b). La Fig. 11 nos muestra el registro de mareas durante un mes y en ella se aprecia el régimen mixto y semidiurno de las mismas.

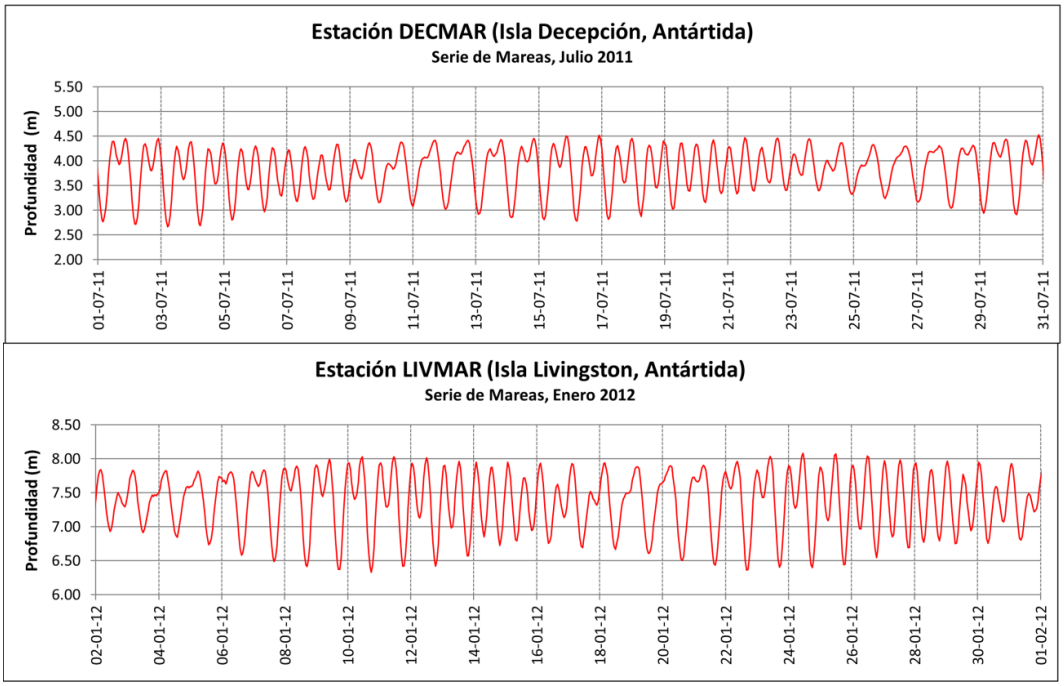



**Figura 3.10:** Serie de marea en LIVMAR (Enero/2012) y DECMAR (julio/2011).

Al contar con una serie de más de dos años de observaciones, en el análisis armónico hemos obtenido setenta constituyentes de marea, entre las cuales tenemos constituyentes de frecuencia quincenal, mensual, semianual y anual.

El resultado del ajuste entre los datos reales y los datos predichos es de un 99.3%, que es un parámetro excelente y muy representativo para realizar predicciones en base a los datos obtenidos y utilizados en el análisis.

Para la obtención de las amplitudes y los retardos de fase de los diferentes constituyentes, hemos utilizados el análisis armónico por mínimos cuadrados, habiendo obtenido 70 armónicos, siendo 19 constituyentes los más representativos, cuya amplitud es superior a 1 cm y que aportan un 93% de la energía de la onda de marea. Los resultados obtenidos nos muestran que la marea en ambas estaciones tiene un régimen de marea mixta con un comportamiento semidiurno.

La Antártida cuenta con muy pocos datos de marea referenciados altimétricamente a puntos de referencia vertical permanentes y que pertenezcan a redes geodésicas. En este trabajo, uno de los objetivos principales fue el establecimiento y ajuste de las marcas de referencia fundamentales, para nuestro caso los TGBM y las marcas auxiliares de referencia de nivel TGAR, que quedaran como *datums* fundamentales para referencia vertical y horizontal de las estaciones mareográficas de LIVMAR y DECMAR y que a partir de la fecha pueden utilizarse como puntos fundamentales en cualquier tipo de trabajo o investigación donde se requiera el nivel medio del mar como plano de referencia vertical.

## 3.5. Determinación del nivel medio del mar en las islas Decepción y Livingston

Con las primeras observaciones de los niveles del mar en Isla Decepción, realizadas por el SHN en 1970 (SHN 1970) se obtuvo el primer vértice geodésico dotado con cota altimétrica obtenida en forma directa a partir de datos de marea. Se definió al vértice BARG como Punto Fundamental de Referencia Altimétrica, vértice perteneciente a la Red Geodésica Isla Decepción (REGID). Se calculó la cota de nivelación para el vértice BARG, obteniendo un valor de 2,547 m.s.n.m., sin corrección gravimétrica, dado que para esa fecha no se había realizado ningún levantamiento gravimétrico en la zona. Esta cota de nivelación se trasladó hasta el punto LN00, mediante nivelación geométrica, obteniendo un valor 5,430 m.s.n.m. Posteriormente este *benchmark* fue definido como Punto fundamental de la Red de Nivelación de Isla Decepción (RENID) (Berrocoso et al. 2008).

Durante las campañas 2007-2008, se fondearon dos mareógrafos de presión, estableciéndose de forma temporal las estaciones mareográficas DECMAR (isla Decepción) y LIVMAR (isla Livingston), obteniendo datos durante 81 días, desde diciembre 2007 hasta febrero 2008. A partir de estos registros de marea se determinan provisionalmente los primeros niveles medios del mar en estas islas, tomando como vértices de referencia a las estaciones COLA (isla Decepción) y BEJC (isla Livingston), ambos pertenecientes a la red REGID. Se obtuvieron las respectivas cotas geométricas, referidas nivel medio del mar, cuyos valores fueron de 12,36 m.s.n.m. y 28,85 m.s.n.m para BEJC y COLA respectivamente, calculados para una presión atmosférica de referencia de 990 mb (Vidal et al. 2012).

Partiendo de estos datos preliminares y contando con nuevas observaciones de marea de más de dos años completos de observación (febrero de 2011 hasta abril de 2013), en ambas islas, se realiza una nueva determinación del nivel medio del mar. En esta Tesis presentamos los resultados de este nuevo cálculo y ajuste para determinación de los niveles del mar en ambas islas, contando con nuevos datos y ajustes gravimétricos y referenciando todos los resultados a los vértices geodésicos de la red REGID y RGAE (Berrocoso et al. 2008). La instrumentación utilizada para la adquisición de datos y la metodología para el cálculo y obtención de los resultados se detalla en la sección 3.2

## 3.6. Resultados y discusión sobre la determinación del nivel medio del mar.

La medidas del nivel del mar fueron vinculados altimétricamente mediante nivelación geométrica a puntos de referencia en tierra, denominados TGBM y TGAR, y a partir de estos a los vértices de la red REGID. Para esta referenciación altimétrica se realizó una comparación de lecturas simultáneas de los niveles de marea del PTG (sensor principal de presión) que estaba fondeado, respecto a un sensor de control colocado en una regla de marea o nivelación (TSG), cuya profundidad se conoce con respecto a un TGBM o TGAR. Para obtener la profundidad del sensor PTG referida al TGBM, hacemos un ajuste lineal de las medidas simultáneas entre los niveles obtenidos por el PTG y los niveles tomados por el sensor TSG del cuál obtenemos su

desnivel, respecto al TGBM de referencia. La Tabla 3.4 muestra los resultados obtenidos del ajuste lineal realizado a las medidas instantáneas del nivel del mar medidas por el sensor PTG y el sensor TSG.

| | DECMAR | LIVMAR |
|---|---|---|
| D (Profundidad del sensor de presión principal, PTG) | 4.14 | 8.76 |
| Error Estándar en XY | 0.05 | 0.08 |
| Profundidad media de la serie de marea | 3.15 | 7.48 |
| Nivel Medio del Mar (NMM) con respecto al TGBM de referencia | 0.99 ± 0.05 | 1.28 ± 0.08 |

**Tabla 3.4:** Resultados del ajuste lineal realizado en las estaciones mareográficas de DECMAR y LIVMAR. con sus errores estimados.

Las referenciación altimétrica también fue realizada con respecto a los vértices de la red REGID, tomando los puntos más cercanos a las estaciones mareográficas, que para nuestro estudio fueron COLA y LN00 (isla Decepción) y BEJC (isla Livingston). Ambos estaciones geodésicas tienen coordenadas absolutas en X, Y, Z y altura elipsoidal (h) respecto al sistema de referencia ITRF2000.

El enlace gravimétrico entre el continente sudamericano y las Islas Shetland del sur, fue realizado desde la base gravimétrica APPA (Punta Arenas, Chile) de la Red Gravimétrica Chilena hasta el vértice geodésico BEJC, situado en la BAE Juan Carlos I en la Isla Livingston, BEJC, y desde este se ha realizado el enlace con el vértice GRAV, definido como la Base Gravimétrica de isla Decepción. A la finalización de la campaña antártica se ha realizado el cierre gravimétrico al retorno al continente sudamericano.

Para la obtención de las alturas ortométricas y ondulación del geoide hemos utilizado la fórmula que aproximadamente es igual a:

$$\mathbf{h = H + N} \qquad \text{(Ec. 3.3)},$$

donde h es la altura elipsoidal, H la altura ortométrica y N es la ondulación del geoide. Sabiendo que de un punto P de la superficie terrestre se conocen la cota ortométrica (H), y la altura elipsoidal (h), se puede determinar de forma muy aproximada la ondulación del geoide (N). Las alturas elipsoidicas (h) han sido obtenidas por observaciones GPS.

En la Tabla 3.5 se muestran los resultados obtenidos de obtención de la cota ortométrica, referida al nivel medio del mar y corregida por efectos gravimétricos. También vemos la relación entre las estaciones mareográficas de LIVMAR (Livingston) y DECMAR (Decepción) con respecto a los vértices geodésicos de referencia. En la tabla también se muestran los valores y los errores estimados de altura ortométrica (H), la ondulación del geoide (N), la diferencia de nivel ($\Delta n$), gravedad (g) y altura elipsoidal (h), calculadas para los vértices de BEJC (isla Livingston) y COLA y LN00 ( isla Decepción). Además, mostramos el valor obtenido del Nivel Medio del Mar (H) para las estaciones de referencia con su error correspondiente, que incluye el error obtenido en la determinación del NMM.

| | Deception | | Livingston |
|---|---|---|---|
| | COLA | LN00 | BEJC |
| h (m) | 47.985 ± 0.002 | 25.069 ± 0.002 | 31.226 ± 0.001 |
| g (mgal) | 982205.580 ± 0.035 | 982206.408 ± 0.051 | 982212.819 ± 0.137 |
| Δn (m) | 29.047 ± 0.003 | 6.200 ± 0.007 | 12.418 ± 0.003 |
| N (m) | 18.966 ± 0.037 | 18.932 ± 0.056 | 18.808 ± 0.017 |
| **H (m)** | **29.05 ± 0.09** | **6.20 ± 0.11** | **12.42 ± 0.10** |

**Tabla 3.5:** Valores obtenidos para la determinación del Nivel Medio del Mar (NMM) en los vértices de referencia de las estaciones mareográficas DECMAR y LIVMAR.

El nivel medio del mar ha sido calculado tomando una serie temporal de más de dos años de duración (798 días) habiéndose obtenido 70 constituyentes de marea, que incluyen las de corto período (semidiurnas, diurnas) y largo período (quincenales, mensuales, semanales y anuales). Se obtuvo además un registro de datos de continuo para las islas de Decepción y Livingston, que es de gran valor comparado con registros anteriores, donde la serie de mayor duración era de 81 de observación (Vidal et al. 2012).

Hemos obtenido la altura ortométrica más precisa, en todos los puntos de control de mareógrafos (TGBM) y en los vértices geodésicos de referencia (BEJC, COLA y LN00), que está corregida por efectos gravimétricos. Además, la nivelación geométrica entre los TGBM, TGAR y los vértices geodésicos de referencia (STGPS) cumple con los estándares para nivelación geométrica de Primer Orden Geodésico, teniendo especial cuidado con el *benchmark* LN00, definido como Punto Fundamental de Referencia Altimétrica de la red REGID y RENID, cuya cota ortométrica queda determinada en 6.200 m.s.n.m.

Las nuevas cotas ortométricas obtenidas tienen una diferencia + 0,06 m para BEJC y de + 0.20m para COLA, respecto a los valores obtenidos por (Vidal et al. 2012), que utilizó una serie de solo 81 días de observación y además no fue corregida por efectos gravimétricos.

En general, los resultados obtenidos en este trabajo han mejorado a los obtenidos en trabajos anteriores realizados en la zona (SHN 1970, Dragani et al. 2004, Vidal et al. 2012).

## Capítulo 4

# Determinación del geoide experimental de precisión en las islas Decepción y Livingston

### 4.1. Antecedentes de trabajos en la zona.

Las primeras observaciones de niveles del mar en isla Decepción fueron realizadas por el Servicio de Hidrografía Naval Argentino (SHNA) en diciembre de 1970, medidos con una regla de marea y registrados por un observador a un dato por hora. La regla de marea fue instalada junto a la Base Antártica Argentina "Decepción" y muy cerca al vértice BARG (Base Argentina). Los datos fueron tomados entre el 13 y el 17 de diciembre.

Durante las campañas antárticas 2001-2002 y 2002-2003 se estableció el marco de nivelación para isla Decepción, que es la red RENID, realizándose la primera determinación de un plano de referencia vertical para Isla Decepción, tomando al vértice BARG como Punto Fundamental de Nivelación. A partir de los datos de marea del SHNA se obtuvo un valor de altura ortométrica de 2,547 m.s.n.m. para la BARG. Este altura ortométrica fue trasladada mediante nivelación geométrica de primer orden geodésico hasta el benchmark LN00, ubicado en las inmediaciones de la Base Antártica Española "Gabriel de Castilla" y definido desde entonces como el Punto Fundamental de referencia altimétrica de la red RENID, cuya cota altimétrica referida al nivel medio del mar fue de 5,430 m.s.n.m. A partir de este datum vertical se dotó de cota de nivelación

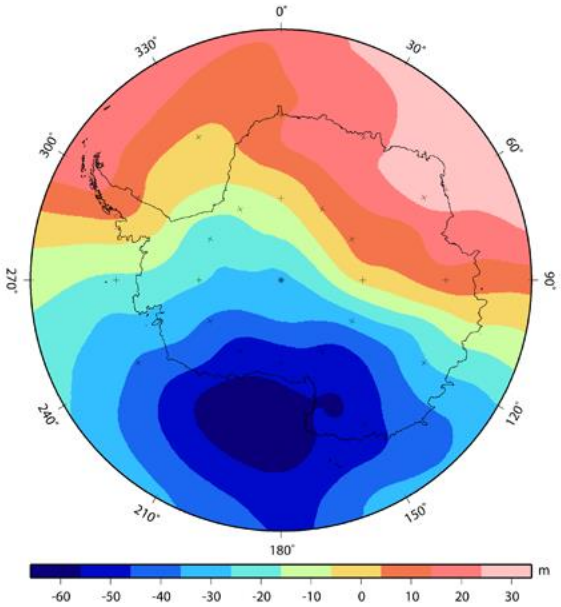



**Figura 4.1:** Mapa geoidal de la Antártida 1990. Fuente: Geoscience Australia

los puntos pertenecientes a las líneas de nivelación de la red RENID, cuyas diferencias de nivel fueron obtenidas por nivelación geométrica y trigonométrica, según fuera el caso.

En 1980 la Oficina de Recursos Minerales de Australia (ahora Geoscience Australia), por encargo del SCAR (Comité Científico de Investigación Antártica) elaboró la primera edición de Mapa Geoidal Antártico a partir del modelo geopotencial GEM10C, con curvas de N cada 20 metros. La segunda edición de esta mapa geoidal fue elaborada en 1990 por el actual Geoscience Australia, se generaron las curvas de N con intervalos de 5 metros, se utilizó como elipsoide de referencia al GRS80 y se utilizaron los coeficientes geopotenciales del modelo OSU89A producidos por el profesor Rapp de la Ohio State University, este modelo lo podemos apreciar en la Figura 4.1.

En 1992, para la elaboración del mapa topográfico de isla Decepción a escala 1:25.000, el Centro Geográfico del Ejército Español (CGE) estableció como valor inicial para la ondulación del geoide (N) un valor convencional de 13 metros (CGE 1992). Este mapa junto a la ortoimagen Antártica, Isla Decepción a escala 1:20.000, son actualmente los referentes cartográficos para toda la comunidad científica internacional.

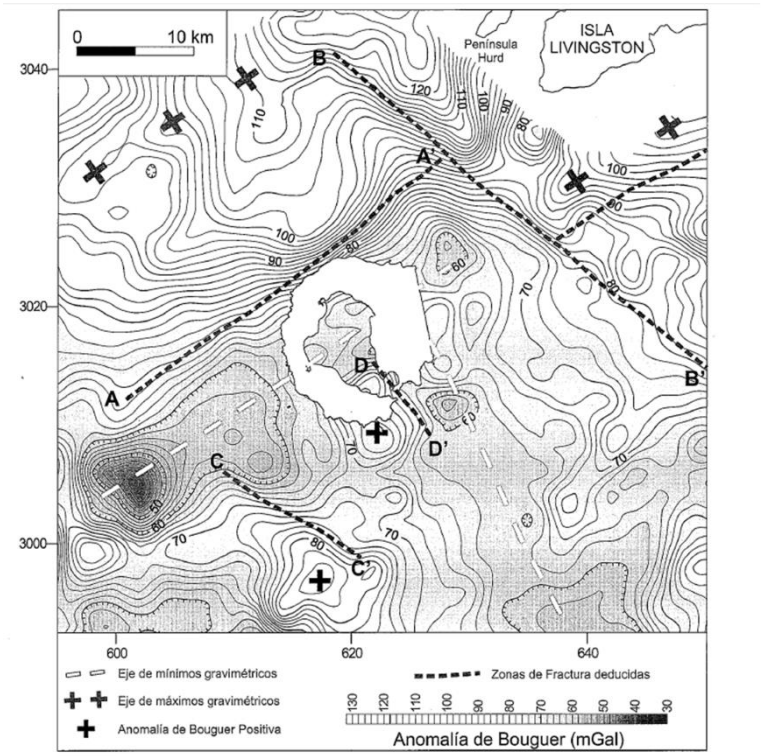



**Figura 4.2:** Mapa de anomalías de Bouguer obtenido por (Carbó et al. 2001) en isla Decepción y su entorno.

En la zona también se han realizado trabajos de geofísica marina, levantamientos gravimétricos y magnéticos de detalle y se han establecido una serie de bases gravimétricas en

la islas Livingston y Decepción. Estas bases gravimétricas han permitido el enlace de las observaciones con el continente sudamericano y también de las observaciones marinas con la red gravimétrica terrestre en Ushuaia (Argentina), Punta Arenas (Chile), BAE Juan Carlos I (isla Livingston) , Base Gravimétrica Argentina y Base Gravimétrica Española en isla Decepción (Ortiz et al., 1992, Carbó et al. 2001, Berrocoso et. al 2006a, 2008). Los trabajos de Carbó et al. (2001) dieron como resultado los mapas de anomalías de Bouguer, tanto en la bahía de Puerto Foster como en la parte exterior de isla Decepción, ver Figura 4.2.

Desde 1988, grupos de investigación argentinos y españoles han realizado un seguimiento sistemático de las actividades volcánicas y tectónicas en las islas Decepción y Livingston utilizando técnicas de geofísica y geodesia. Desde ese año también se comenzaron a establecer las primeras estaciones de la red REGID con la finalidad de estudiar la actividad geodinámica en el volcán Decepción y su entorno (Berrocoso et al. 2006). En la vigilancia realizada a partir de esa fecha, se han detectado dos crisis volcánicas importantes de este volcán, en diciembre y enero de 1991 y en enero y febrero de 1999.

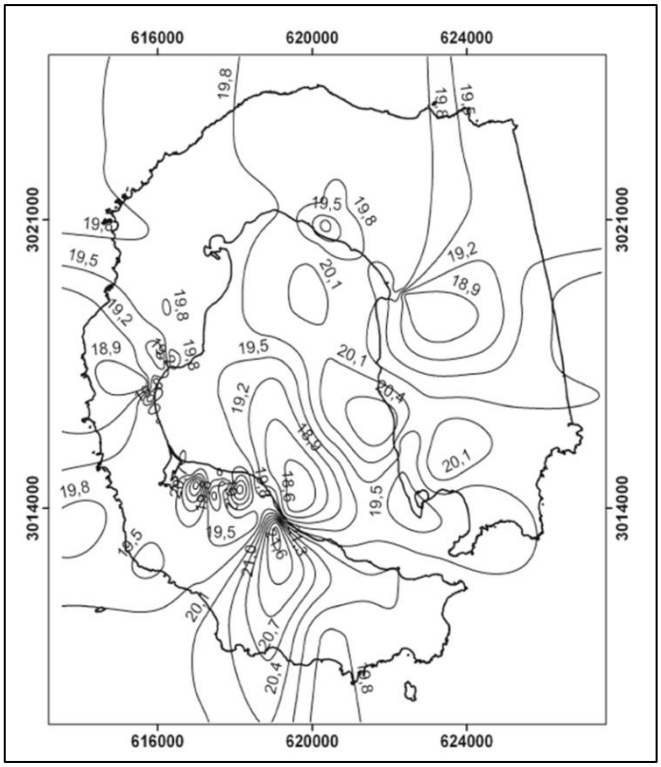



**Figura 4.3:** Geoide Experimental 2007 para isla Decepción (Berrocoso et al. 2007)

El primer geoide experimental de isla Decepción fue calculado según los trabajos de (Berrocoso et al 2007, 2008). El mapa de ondulaciones del geoide de este trabajo se encuentra disponible en el Sistema Web SIMAC (Sistema de Información Multidisciplinar de Apoyo Científico para Isla Decepción) y también es explicado a detalle en (Torrecillas et al. 2006). Los valores de este primer geoide experimental fueron calculados de acuerdo a cota ortométrica

definida para LN00 que fue de 5.43 m.s.n.m., obteniendo un valor medio de la ondulación del geoide (N) de 19.59 m para isla Decepción (Berrocoso et al. 2006a, 2007, 2008, 2012), este valor que fue obtenido en base a datos experimentales tomados en el terreno tiene una diferencia de más de 6 metros respecto al valor definido en 1992, para más detalles acerca del modelo de Geoide Experimental 2007 ver la Figura 4.3.

Desde 2007, el Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía de la Universidad de Cádiz (UCA-LAGC) ha estado realizando en las islas Livingston y Decepción, una serie de nuevas actividades geodésicas y geofísicas entre ellas, nivelaciones geométricas, enlaces trigonométricos, observaciones GPS y observaciones de datos de marea. En la Campaña Antártica Española 2007-2008, se instalaron dos mareógrafos equipados con sensores de presión y temperatura en las estaciones de marea de LIVMAR, ubicada en caleta Johnson, isla Livingston, que es una cala poco profunda, semi-cerrada situado en la parte sur de la isla, cerca del punto geodésico BEJC y DECMAR, ubicada en Punta Colatinas, isla Decepción, ver Fig. 2.1, a fin de realizar la adquisición de datos de marea en ambas estaciones para obtener las primeras componentes de marea y determinar el nivel medio del mar en ambas islas.

En 2011, se obtuvieron los primeros resultados de las observaciones directas del nivel medio del mar en base a 81 días de datos tomados en ambas islas (Vidal et al. 2012). Posteriormente, se obtuvieron mejores resultados en la determinación del nivel medio del mar en ambas islas, puesto que se realizó un nuevo ajuste de los datos utilizando una serie temporal con más de dos años de datos continuos observados. Se calculó de un nuevo valor de la altura ortométrica para el vértice LN00 de 6,20 m.s.n.m. (Jigena et al. 2014) . Este trabajo ha sido especialmente riguroso puesto que una determinación precisa del nivel medio del mar influye significativamente en la determinación del geoide (Reyes et al 2015). Todos estos datos y la metodología adecuada han sido fundamentales para la determinación de un nuevo geoide local de precisión en isla Decepción, que hemos denominada GeoiDEC2014, que es el resultado del presente Tesis Doctoral siendo los resultados muy satisfactorios, con los que hemos conseguido un progreso significativo en cuanto a precisión respecto a los resultados obtenidos en 2008 y a los modelos globales de uso en la zona.

## 4.2. Modelos globales válidos en la zona de interés.

En nuestra área de estudio tenemos varios modelos geopotenciales globales que pueden ser utilizados en nuestra área de estudio, entre ellos podemos destacar a los más representativos como el EGM1996 y EGM2008 y los más nuevos como e GRACE 2003 y el GRACE2014, que a continuación describiremos de forma resumida.

### *4.2.1. Modelo EGM96*

Este modelo geopotencial fue desarrollado como resultado de la colaboración entre NIMA (National Imagery and Mapping Agency), la NASA a través del GSFC (Centro Goddard,

Goddard Space Flight Center) y la Universidad de Ohio (Ohio State University). Este modelo supuso un gran avance en las determinaciones de los modelos geopotenciales ya que se basa en el nuevo modelo satélite EGM96S determinado a partir de medidas a más de 40 satélites, incorpora datos de gravedad aerotransportada sobre el Ártico y Groenlandia, datos gravimétricos y altimétricos de diferentes satélites, sobretodo de las nuevas misiones TOPEX/POSEIDON y ERS-1 de aquellos años, una base de datos gravimétrica con más de 4000 fuentes y un nuevo modelo topográfico global JGP95E para el relleno de aquellas áreas vacías (Sur del Pacífico y Sur del Océano índico). También se incorporaron anomalías altimétricas en la región antártica, específicamente sobre el mar de Weddell y el NIMA hizo posible densificar a una grilla de 30' x 30' las anomalías de la gravedad obtenidas de la misión GEOSAT .

El cálculo se realizó utilizando un ajuste mínimo cuadrático hasta el orden 70, una combinación diagonal de bloques de ecuaciones normales hasta el orden 359 y fórmulas de cuadratura para llegar al orden 360. Los principales parámetros elipsoidales a los que responde la solución de los coeficientes son: GM = 3986004.415*108 $m^3/s^2$, a = 6378136.46 m, $\omega = 7292115*10^{-11}$ rad/s, f = 1/298.25765.

En esta solución todos los datos de gravedad en los que se identificó claramente su sistema de referencia fueron transformados a WGS84 usando transformaciones propias de la NIMA. Para más detalles ver (Lemoine et al. 1998). En la Figura 4.4 se puede ver la distribución global el modelo EGM96 sobre el elipsoide WGS84.

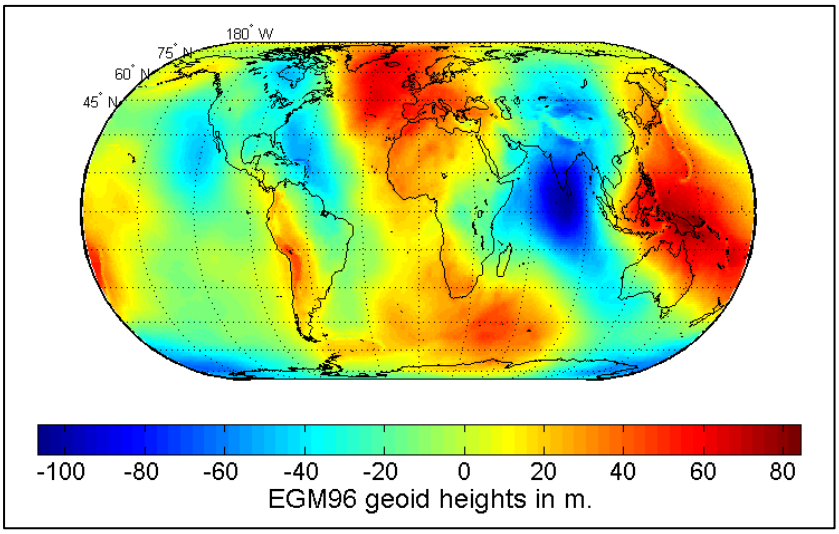



**Figura 4.4:** Modelo geopotencial EGM 96, valores de N

### *4.2.2. Modelo EGM2008*

De forma oficial el Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) fue lanzado públicamente por la NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) de los Estados Unidos. Este modelo

gravitacional es completo para los armónicos esféricos de grado y orden 2159 y contiene los coeficientes adicionales para extenderse hasta el grado 2190 y orden 2159. Las constantes WGS- 84 utilizadas para definir el elipsoide de referencia y el campo de gravedad normal asociado, al que están referidas las ondulaciones del geoide (N) son: a = 6.378.137,00 m, f = 1 / 298,257223563, GM = 3,986004418 x 1014 $m^3/s^2$, ω = 7292115 x $10^{-11}$ rad /s. Todos los coeficientes y cuadrículas de geoide asumen un sistema libre de marea.

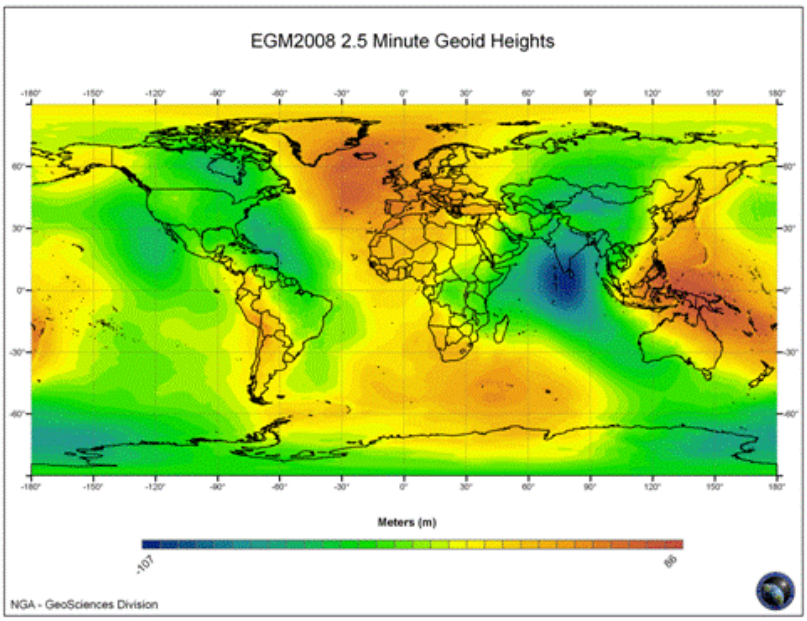



**Figura 4.5:** Modelo geopotencial EGM 2008, valores de N

### *4.2.3. Modelo GGM03 (GRACE Gravity Model 2003)*

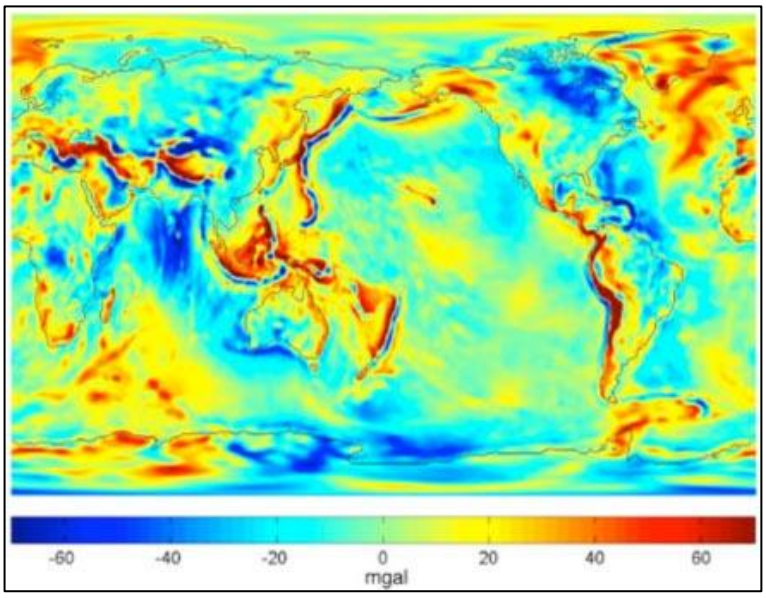



**Figura 4.6:** Modelo GGM03, valores de anomalías de la gravedad (mGal)

El modelo GGM03 (GRACE Gravity Model 03) fue dado a conocer a la comunidad científica en diciembre de 2006. Este modelo global de la gravedad de la Tierra, tiene una mejora significativa respecto a los modelos anteriores el GGM01y el GGM02. El modelo GGM03 está basado en el análisis de cuatro años de datos de la misión GRACE, repartidos entre enero de 2003 y diciembre de 2006. Al igual que los anteriores modelos, el GGM03 tiene dos formatos, el GGM03S con los armónicos hasta el grado 180 y ha sido obtenido solamente con los datos del satélite GRACE, y no tiene restricciones para cualquier otra información; el formato GGM03C, es el modelo completo de armónicos esféricos hasta el grado 360 y además tiene datos combinados terrestres (tierra y océano) y datos de gravedad.

### *4.2.4. ModeloITSG-Grace2014s*

El modelo ITSG-Grace2014s, denominado solución estática, es un modelo del campo gravitatorio terrestre obtenido por satélites y contando solamente con datos GRACE, con datos desde febrero de 2003 hasta diciembre de 2013. Además de considerar estático el campo gravitatorio en la estimación del modelo se han considerado las variaciones diarias, seculares y anuales, teniendo en cuenta las correlaciones entre cada componente. El resultado es una solución estática de alta resolución de grado y orden 200 considerando las variaciones seculares y anuales complementarias hasta grado y orden 100. Las variaciones temporales fueron regularizadas mediante una función Kaula a partir del grado 21. Cada componente de la solución contiene la señal completa del campo gravitatorio, incluyendo la parte atmosférica y las masas oceánicas. La época de referencia del modelo es 1 de enero de 2008.

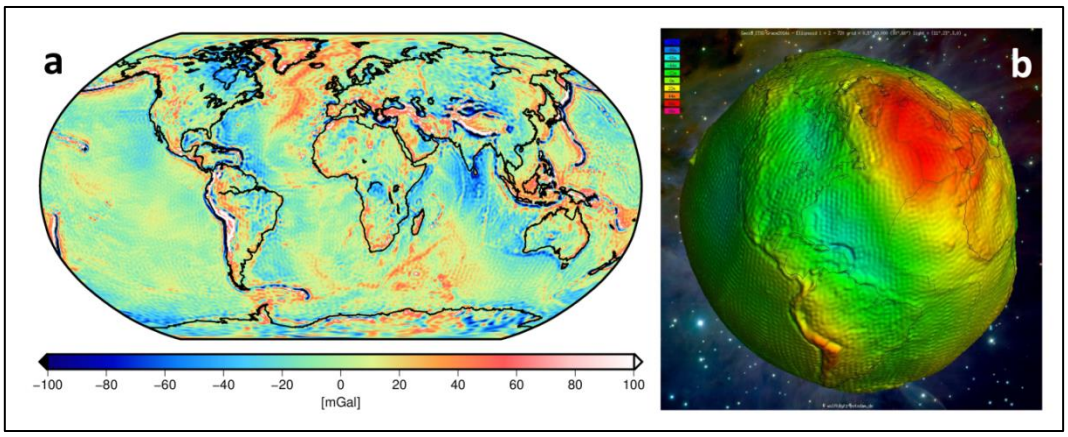



**Figura 4.7:** Modelo ITSG-Grace2014s. **a**. Valores de anomalías de la gravedad (mGal).
**b.** Valores ondulación del geoide (m)

En la Figura 4.7 podemos observar los valores que toman en nuestra área de estudio los modelos globales utilizados y vemos que todos los valores de N son superiores a los 19, 50 metros, siendo el modelo ITSG-Grace14s el que tiene los valores de N más bajos.

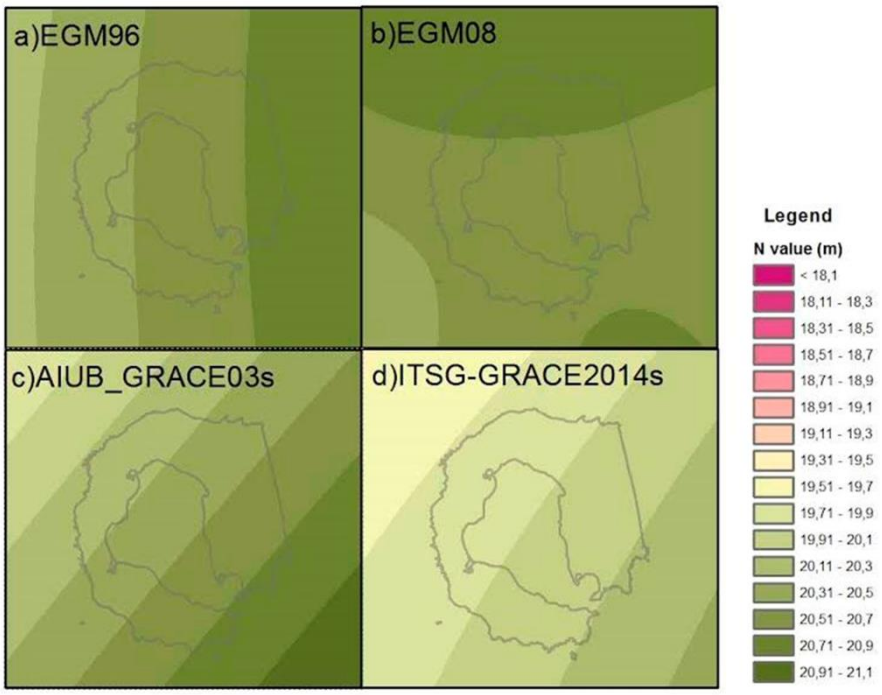



**Figura 4.8:** Valores de N (metros) de los diferente modelos globales utilizados

## 4.3. Metodología para el cálculo del geoide

El método desarrollado está basado en la determinación de la ondulación del geoide (N) a partir de la diferencia entre la altura elipsoidal (h), obtenida directamente mediante observaciones GPS, y la altura ortométrica (H) obtenida por nivelación geodésica (geométrica o trigonométrica y corregida por efectos gravimétricos mediante medidas de la gravedad (Heiskanen & Moritz 1985, Torge 1991, Berrocoso et al. 1996). Para la determinación del geoide de precisión se utilizó la metodología GPS/Nivelación/Gravedad, debido a que la misma computacionalmente es fácil de implementar, ya que simplemente se manejan vectores del tamaño de la cantidad de datos disponibles y el método se basa en la resolución de ecuaciones de segundo grado. Sin embargo, el método exige bastante rigurosidad en los datos de entrada, puesto que para su implementación es necesario disponer de observaciones GPS, medidas de nivelación y de gravedad absoluta en todos los puntos de observación, que en ocasiones, resulta inviable, por sus consecuencias en cuanto a costo, pero nos garantiza los mejores resultados en áreas poco extensas con un radio menor a los 50 kilómetros (Leick, 2004) , siempre y cuando se cuenten con la suficiente cantidad y calidad de datos.

Usando la ecuación 3.3, que nos relaciona geométricamente la ondulación del geoide (N), la altura elipsoidal (h) y la altura ortométrica (H), obtenemos de forma muy aproximada la ondulación del geoide. En la Fig. 4.8 observamos los diferentes valores y direcciones que puede tomar el vector gravedad en cada una de las superficies que disponemos para el análisis y resolución de la forma de la Tierra, con amplia aplicación en estudios geodésicos y geofísicos

de la Tierra y donde podemos apreciar la aplicación de la expresión (3.3) para obtener los valores de la ondulación del geoide (N), con los que finalmente determinamos la superficie física de referencia, en nuestro caso el geoide, obtenido mediante la interpolación de los valores experimentales de la ondulación del geoide (N).

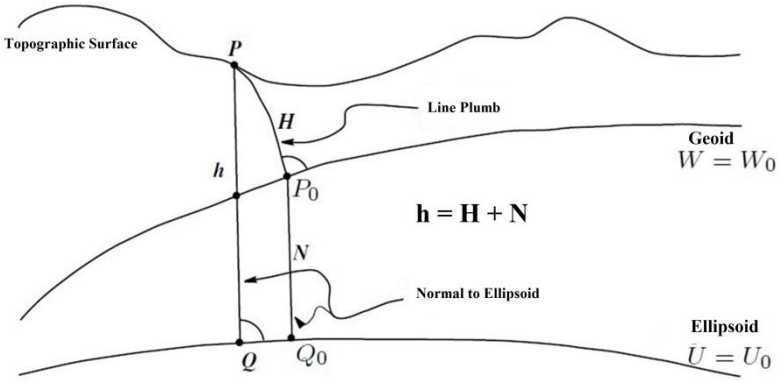



**Figura 4.9:** Relación entre el geoide, elipsoide y la superficie topográfica terrestre. También apreciamos la relación geométrica entre N, H y h (Ec. 3.3)

Dado que la altura elipsoidal (h) la obtenemos directamente mediante observaciones GPS y partimos de un punto de altura ortométrica (H) conocida, el problema para la aplicación del método se reduce a obtener la altura ortométrica en los demás puntos. Considerando que el área de estudio es relativamente pequeña y partimos de un punto de referencia ($P_I$) con altura ortométrica conocida ($H_{Pi}$) podemos considerar que el siguiente punto o punto a calcular ($P_J$) está lo suficientemente próximo como para unirlos directamente mediante un solo tramo de nivelación; en definitiva, para obtener el valor de la altura ortométrica de un punto Pj ($H_{Pj}$) conociendo la cota ortométrica de un punto Pi, la diferencia de nivel entre ambos puntos y el valor de la gravedad en dichos puntos, utilizamos la ecuación (1). Finalmente, la superficie física de referencia física la podemos determinar interpolando los valores experimentales de la ondulación del geoide (N) que hemos obtenido aplicando la ecuación (3.3).

Como hemos podido apreciar, el problema fundamental consistirá en calcular la altura ortométrica en el punto $P_J$ ($H_{Pj}$) a partir de los datos anteriormente expuestos. En esta sección vamos a desarrollar una ecuación que nos permita calcular este valor partiendo de la diferencia de alturas ortométricas $\Delta H_{Pi;j}$ entre el punto de cálculo Pj y el punto de referencia Pi, haciendo uso para ellos de algunos conceptos geodésicos.

El numero geopotencial C, que lo podemos definir como la diferencia de alturas ortométricas (H) entre dos puntos por la gravedad media a lo largo de la línea de la plomada (Heiskanen W.A. and Moritz H., 1985) es la siguiente:

$$\Delta H_{P_{i,j}} = H_{P_i} - H_{P_j} = \frac{C_{P_i}}{\bar{g}_{P_i}} - \frac{C_{P_j}}{\bar{g}_{P_j}} \qquad (4.1)$$

Introduciendo el concepto de altura dinámica $H_{P_i}^{din}$ (Heiskanen and Moritz, 1985), tenemos que:

$$H_{P_i}^{din} = \frac{C_{P_i}}{\gamma_0^{45°}} \qquad (4.2)$$

Dónde:

$\gamma_0^{45°} = 980629.388$ mGal , es el valor de la gravedad normal al nivel del mar en latitud de 45º, referido al elipsoide WGS-84. Entonces partiendo de (4.2), tenemos:

$$\Delta H_{P_{i,j}} = H_{P_{ij}}^{din} + \left(H_{P_i} - H_{P_i}^{din}\right) - \left(H_{P_j} - H_{P_j}^{din}\right) \qquad (4.3)$$

El primer término del segundo miembro en (4.3) puede desarrollarse como:

$$H_{P_{ij}}^{din} = \int_{P_i}^{P_j} dn + CD_{P_{ij}} \qquad (4.4)$$

Donde,

$$CD_{P_{ij}} = \int_{P_i}^{P_j} \frac{g - \gamma_0^{45º}}{\gamma_0^{45º}}\, dn$$

Que se denomina *corrección dinámica* entre los puntos $P_i$ y $P_j$.

La diferencia entre la altura dinámica y la altura ortométrica de cierto punto P, es la corrección dinámica entre el punto P y su correspondiente punto $P_0$ en el geoide, esto es

$$H_p - H_P^{din}\; CD_{P,P_0} = -\int_{P_0}^{P} \frac{g - \gamma_0^{45º}}{\gamma_0^{45º}}\, dH \qquad (4.5)$$

Por lo tanto, reemplazando (4.4) y (4.5) en (4.3) se puede obtener fácilmente la siguiente expresión:

$$\Delta H_{P_{i,j}} = \int_{P_i}^{P_j} dn + \int_{P_i}^{P_j} \frac{g - \gamma_0^{45º}}{\gamma_0^{45º}} dn - \int_{P_{i_0}}^{P_i} \frac{g - \gamma_0^{45º}}{\gamma_0^{45º}} dH + \int_{P_{j_0}}^{P_j} \frac{g - \gamma_0^{45º}}{\gamma_0^{45º}} dH \qquad (4.6)$$

Para evaluar esta expresión, usando datos discretos, podemos escribirla como:

$$\Delta H_{P_{i,j}} = \Delta n_{P_{i,j}} + \sum_{k=P_i}^{P_j} \frac{g_k - \gamma_0^{45º}}{\gamma_0^{45º}} \delta n_k - \frac{\bar{g}_{P_i} - \gamma_0^{45º}}{\gamma_0^{45º}} H_{P_i} + \frac{\bar{g}_{P_j} - \gamma_0^{45º}}{\gamma_0^{45º}} H_{P_j} \quad (4.7)$$

Donde Δn es la diferencia de nivel (nivelación geométrica) entre dos puntos, $\bar{g}$ es la gravedad media a lo largo de la línea de la plomada en un cierto punto, g es la gravedad absoluta y el subíndice k nos indica los puntos intermedios del tramo de nivelación entre los puntos $P_i$ *a* $P_j$ , de donde tenemos que $\delta n_k = \Delta n_{P_{k-1,k}}$ .

El valor de la gravedad de un punto Z situado a lo largo de la línea de la plomada en correspondencia con el punto P, se aprecia en la Fig. 4.9

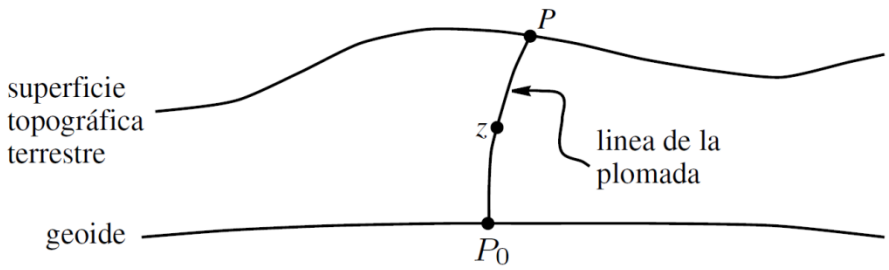



**Figura 4.10:** Gravedad media a lo largo de la línea de la plomada, es necesario conocer la gravedad absoluta en un punto z cualquiera.

Para calcular la gravedad media $\overline{g_P}$ de un cierto punto P, usamos la reducción de Poincaré y Prey (Heiskanen & Moritz, 1985).

$$g_Z = g_{P_i} - \int_Z^{P_i} \frac{\partial g}{\partial H} dH \quad (4.8)$$

Para calcular el gradiente de la gravedad usamos la fórmula de Bruns (Torge 2001):

$$\frac{\partial g}{\partial H} = -2gJ + 4\pi k\rho - 2\omega^2 \quad (4.9)$$

Donde $J$ es la curvatura media de la superficie geopotencial, k es la constante de gravitación universal, ρ es la densidad media de la corteza terrestre y ω es la velocidad angular de rotación de la Tierra.

Otra forma de expresar el gradiente de la gravedad normal es usando la latitud (φ), de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \gamma}{dh} = -2\gamma J_0 - 2\omega^2 = -0.30877\,(1 - 0.00142 sin^2\varphi)10^{-5}\frac{m}{s^2} \qquad (4.10)$$

Donde $J_0$ es la curvatura media de la superficie esferopotencial

Consideramos la aproximación de $gJ$ aproximado a $\gamma J_0$ y las latitudes de los puntos $P_i$ y $P_{i0}$ para obtener:

$$\frac{\partial g}{\partial H} = \frac{\partial \gamma}{\partial h} + 4\pi k\rho = -0.0848\ gal/km \qquad (4.11)$$

En la expresión (11) utilizamos los valores de:

ρ = 2670 Kg/ $m^3$, que es el valor media de la corteza continental utilizado en los trabajos de (Carbó et al. 2001) para la corrección de las lecturas gravimétricas en la parte terrestre de Isla Decepción.

k = 6.67 x $10^{-11}$ $Nm^2$ / $kg^2$ en unidades S.I.

ω = 7292115 x$10^{-11}$ rad/s.

Por lo tanto, reemplazando en (8) la expresión de la gravedad en Z tenemos:

$$g_z = g_{P_i} + 0.0848\left(H_{P_i} - H_Z\right) \qquad (4.12)$$

Finalmente, la gravedad media a lo largo de la línea de plomada correspondiente a P, será:

$$\overline{g_P} = \frac{1}{H_P}\int_0^P g_z dH_z = g_P + 0.0424 * 10^{-3} H_P \qquad (4.13)$$

Donde $g_P$ está en Gals y $H_P$ en metros. Usando este valor en la expresión (7) tenemos:

$$\Delta H_{P_{i,j}} = \Delta n_{P_{i,j}} + \sum_{k=P_i}^{P_j} \frac{g_k - \gamma_0^{45°}}{\gamma_0^{45°}} \delta n_k - \frac{\overline{g_{P_i}} - \gamma_0^{45°}}{\gamma_0^{45°}} H_{P_i}$$

$$+ \frac{g_{P_j} + 0.0424 * 10^{-3} H_{P_i} - \gamma_0^{45°}}{\gamma_0^{45°}} H_{P_j} \qquad (4.14)$$

Reordenando términos, finalmente obtenemos la siguiente expresión:

$$0.0424 * 10^{-3} H_{P_j}^2 + g_{P_i} H_{P_j} - \left( g_{P_j} \Delta n_{P_{i,j}} + g_{P_i} H_{P_i} + 0.0424 * 10^{-3} H_{P_i}^2 \right) = 0 \qquad (4.15)$$

De esta forma, la altura ortométrica $H_{P_j}$ del punto $P_j$ puede ser calculada a partir de la altura ortométrica $H_{P_i}$ en el punto de referencia $P_i$, la diferencia de nivel (nivelación geométrica) $\Delta n_{P_{i,j}}$ entre los puntos $P_i$ y $P_j$ y los valores de la gravedad absoluta en estos puntos, $g_{P_i}$ y $g_{P_j}$.

Los errores asociados a cada punto fueron obtenidos aplicando las leyes de la propagación de errores al método de determinación del geoide GPS/nivelación/gravedad. Por lo tanto, el error total será:

$$\sigma_N = \sigma_h + \sigma_H \qquad (4.16)$$

Donde, el error en la altura elipsoidal ($\sigma_h$) se obtiene del procesado GPS y el error en la altura ortométrica ($\sigma_H$) lo calculamos hacienda uso de la siguiente expresión:

$$\sigma_{H_{P_j}} = \frac{1}{R_{i,j}} \left[ \left( \frac{R_{i,j} - g_{P_j} + 0.848 \cdot 10^{-4} \Delta n_{P_{i,j}}}{0.848 \cdot 10^{-4}} \sigma_{g_{P_j}} \right)^2 + \left( g_{P_j} \cdot \sigma_{\Delta n_{P_{i,j}}} \right)^2 + \left( H_{P_i} \cdot \sigma_{g_{P_i}} \right)^2 + \right.$$

$$\left. \left( \left( g_{P_i} + 0.848 \cdot 10^{-4} \right) \sigma_{H_{P_i}} \right)^2 \right]^{1/2} \qquad (4.17)$$

Donde $P_i$ y $P_j$ son los puntos de referencia y a calcular, respectivamente y $\boldsymbol{R_{i,j}}$ viene dado por la siguiente expresión:

$$R_{i,j} = \left[g_{P_j}^2 + 1.696 \cdot 10^{-4}\left(g_{P_j}^2 \cdot \Delta n_{P_{i,j}} + g_{P_i} \cdot H_{P_i} + 0.424 \cdot 10^{-4} H_{P_i}^2\right)\right]^{1/2} \qquad (4.18)$$

El desarrollo matemático de las expresiones que intervienen en los cálculos de la determinación del geoide, han sido realizadas en el LAGC-UCA

## 4.4. Equipamiento, adquisición y procesamiento de datos.

Para realizar la determinación de un geoide experimental es necesario contar con un conjunto completo de datos consistentes en observaciones GPS, datos de nivelación y medidas gravimétricas. Todos los datos que se utilizaron para el presente trabajo pertenecen al LAGC-UCA y fueron tomados en diferentes campañas antárticas, desde la campaña 1989-1990 hasta la campaña 2012-13. Los datos GPS, gravimétricos y de nivelación fueron tomados con fines geodésicos y geofísicos para el establecimiento de las redes geodésicas, de nivelación y de gravimetría en la Antártida y principalmente en las islas Decepción y Livingston (Berrocoso et al. 2008). A partir de la campaña 2007-2008 hasta la campaña 2012-13, las redes geodésicas se han actualizado y ampliado; además, para la determinación del nivel medio del mar, se obtuvieron datos meteorológicos de clima y datos de marea. El marco de referencia geodésico fue actualizado y en consecuencia está actualización repercute en actualización de la cartografía de la isla, estos trabajos se detallan en (Torrecillas 2011, Vidal et al. 2012, Berrocoso et al. 2012, y Jigena et al. 2014).

Los equipos y datos específicos que se vayan a utilizar en el cálculo del geoide de la isla Decepción deben cumplir con las especificaciones técnicas y geodésicas que garantizan la calidad de los mismos y en particular las siguientes especificaciones:

- Todos los puntos geodésicos deben estar incluidos en una red geodésica y / o gravimétrica, diseñada y creada con esta finalidad y cuyos datos han sido adquiridos, analizados y procesados estándares geodésicos, como es el caso de las redes REGID, RENID y REGRID.
- Todas las coordenadas deben estar referenciadas a un único Sistema de Referencia Geodésico y con respecto a las estaciones IGS (Internacional GNSS Service). En nuestro caso se utilizó la solución GPS ITRF2000.0 en las coordenadas de todos los puntos geodésicos de la red REGID, RENID y REGRID. El procesamiento de datos GPS se lo realizó con respecto al punto geodésico fundamental BEGC en la Isla Decepción. Las coordenadas geodésicas ITRF2000.0 para el vértice BEJC se obtuvieron con respecto a las estaciones OHI2 (Base Chilena O'Higgins y PALM (Base Estadounidense Palmer) siendo ambas estaciones pertenecientes al IGS.
- Las diferencias de altura o de nivel, ya sean la altura ortométrica entre los puntos de las diferentes redes geodésicas, como las medidas de nivelación geométrica entre las

estaciones de la red REGID, los marcas de nivelación de la red RENID o entre los puntos gravimétricos auxiliares de la red REGRID deben realizarse preferentemente por nivelación geométrica y tomando como punto de referencia altimétrico el LN00.

- Los medidas gravimétricos relativas en isla Decepción para la redes REGID, RENID y los puntos gravimétricos auxiliares deben realizarse con respecto al vértice GRAV, base gravimétrica en isla Decepción.

Los datos geodésicos utilizados como marco de referencia para los trabajos de esta Tesis Doctoral, han sido las redes establecidas en la Antártida, las mismas que han sido descritas en el Capítulo 2, sección 2.3, pero que a continuación vamos a mencionar brevemente para facilitar la lectura del trabajo:

- Red RGAE, es una red geodésica de ámbito regional y constituye el marco de referencia geográfico en la región formada por las Islas Shetland del Sur, el Mar de Bransfield y la Península Antártica (Fig. 2.11), el único vértice perteneciente a esta red y que ha sido utilizado en nuestros trabajos es el vértice BEJC, punto fundamental de control horizontal, vertical y gravimetría en isla Livingston.
- Red REGID, es una red de ámbito local establecida originalmente para constituir el marco de referencia geodésico para cualquier actividad científica o técnica en Isla Decepción, está constituida por 12 vértices ubicados alrededor de la bahía de Puerto Foster, aunque por efectos prácticos también se suele incluir en esta red al vértice BEJC (isla Livingston) y a los vértices LN00 y GRAV, punto fundamentales de altimetría y gravimetría en isla Decepción, respectivamente, la ubicación de los vértices podemos verla en las figuras 2.12, 2.14, 2.17.
- Red RENID, constituye el marco de referencia altimétrico en isla Decepción, constituida por 48 marcas de nivelación (benchmarks), divididos en 6 líneas de nivelación independientes, además de los 12 vértices de la red REGID, el vértice GRAV y el TGBM (benchmark de control de mareógrafo) de la estación DECMAR controlen esta red se incluye el punto fundamental de referencia altimétrica que el benchmark LN00, situado junto a la Base Antártica Española "Gabriel de Castilla". La ubicación de los puntos la red y sus líneas de nivelación correspondientes podemos verlos en la Fig. 2.14.
- Red REGRID constituye el marco de referencia gravimétrico en la isla y al cual deben ser referidas todas las medidas de gravedad y estudio de las anomalías gravimétricas que se realizan en la isla. Está constituida por las 12 estaciones geodésicas de la red REGID, las 48 marcas de nivelación de la red RENID y 46 marcas auxiliares para gravimetría. Esta red incluye además, el vértice GRAV, punto fundamental de gravimetría de Isla Decepción, el vértice BEJC, punto Fundamental de gravimetría de Livingston y el pilar gravimétrico situado en el sótano de la antigua Base Argentina “Decepción”. La ubicación de los puntos de la red la podemos ver en la Fig. 2.17.

Los datos GPS para el posicionamiento de los puntos y estaciones de referencia fueron tomadas de (Berrocoso et al. 2008). Las estaciones geodésicas tienen coordenadas absolutas en X, Y, Z, y latitud (φ), longitud (λ) y altura elipsoidal (h), referenciadas respecto al sistema ITRF2000 con milímetros de precisión (Altamimi, Sillard y Boucher, 2002).

Los equipos utilizados fueron receptores GPS geodésicos Leica GX1230 y TRIMBLE 5700 que tienen una precisión (RMS) para levantamientos estáticos (fase) en pos-proceso con antena geodésica estándar igual a 5 mm + 0,5 ppm en horizontal y 10 mm + 0,5 ppm en vertical. Las campañas GPS fueron de al menos 28 días de observación (campaña 1989-1990) y a partir de ese año los días de campaña han incrementado, teniendo a la fecha un promedio de 41 días de observación por campaña, incluyendo la campaña Antártica 2012-13.

Para obtener precisión milimétrica, las observaciones GNSS-GPS se realizaron con especificaciones para levantamientos geodésicos, utilizando el método de Posicionamiento Estático. Para este tipo de levantamiento es necesario tener al menos una estación de referencia con coordenadas absolutas precisas conocidas. Las sesiones de observación fueron programadas con al menos 24 horas de observación con una frecuencia de muestreo en épocas de 1 segundo y máscara de elevación de 10º. Para el procesamiento y ajuste de la red se utilizó el software Bernese versión 5.0 (Beutler et al. 2001). En el procesamiento de los datos todas las coordenadas de isla Decepción (red REGID) fueron obtenidas con respecto a las estaciones de referencia BEGC y BEJC y se llevó a cabo en dos fases. En la primera fase del procesado se utilizaron como estaciones de referencia a las estaciones IGS OHI2 ubicada en la Península Antártica (Base Antártica Chilena O'Higgins), y la estación IGS PALM ubicada en la isla Anvers (Base Antártica Estadounidense Palmer). A partir de estas estaciones se obtuvieron las coordenadas geocéntricas absolutas para la estación BEGC (isla Decepción) y BEJC (isla Livingston). En la segunda etapa se realizó el procesado y ajuste de las coordenadas de las estaciones restantes de isla Decepción, que fue realizado respecto a las estaciones BEGC y BEJC (Berrocoso et al. 2008). En el procesamiento de datos se utilizaron las efemérides precisas del IGS y los ficheros de polo. Las líneas de base fueron procesadas de forma independiente utilizando la estrategia de resolución de ambigüedades QIF (Quasi Ionosfera gratuito). Los parámetros troposféricos fueron estimados utilizando el modelo troposférico de Saastamoinen, como se sugieren (Bouin & Vigny, 2000) para el procesamiento de datos GPS en las regiones antárticas. Las coordenadas ajustadas de la red geodésica REGID se muestran en la Tabla 2.1.

Las medidas gravimétricas se obtuvieron con un gravímetro relativo Lacoste Romberg D-203, que tiene una precisión de lectura de ± 0,01 mGal, y una deriva estática de menos de 1 mGal/mes (Berrocoso et al. 2008). Las correcciones por marea, altura y deriva se aplicaron a todo el conjunto de datos gravimétricos. La corrección por marea fue calculada para la latitud media de isla Decepción (φ = 62º57'30 " S) elaborando la curva de corrección diaria que fue aplicada con el signo respectivo a cada lectura del gravímetro.

La corrección deriva del gravímetro fue controlada por medio de las lecturas realizadas en la estación base o de referencia al principio y al final de cada circuito. Hemos supuesto una corrección por deriva de tipo lineal puesto que el tiempo entre cada circuito era generalmente menor a seis horas. La corrección fue distribuida proporcionalmente en cada circuito de acuerdo a la hora de la realización de la medida en cada estación, aplicando la corrección con su signo. La corrección por la marea y deriva fue aplicada de acuerdo a (Martin-Furones, 2000).

La corrección por altitud, debido a la variación de altura sobre el nivel del mar entre el punto de referencia y la estación de medida, fueron aplicadas como corrección Libre-Aire y corrección de Bouguer de acuerdo a lo especificado en (Heiskanen y Moritz, 1985). Valores gravimétricos obtenidos y los errores estimados se muestran en la Tabla 2.4.

Las alturas ortométricas (H) fueron calculadas según (Heiskanen &Moritz 1985, Berrocoso et al. 1996) utilizando la altura elipsoidal (h), obtenida a partir de medidas GPS, además de las diferencias de nivel ($\Delta n$) y aplicando la corrección por gravedad (g).

Las medidas del nivel del mar fueron vinculados a los puntos fijos de referencia en tierra, denominados TGBM, mediante la comparación de lecturas simultáneas de nivelación geométrica realizadas con un de nivel óptico (Nivel Leica NA2), entre un sensor de presión colocado en una regla respecto al desnivel determinado por otra regla de nivelación colocada sobre la referencia altimétrica del TGBM correspondiente, de cota altimétrica conocida. Mediante el método de nivelación geométrica de precisión se calcularon las alturas de los TGBMs respecto a las estaciones geodésicas cercanas de la red REGID, utilizando los vértices COLA y LN000 en isla Decepción y BEJC en isla Livingston.

## 4.5. Medidas realizadas en isla Livingston

En la isla Livingston, se obtuvo una nueva altura ortométrica para el vértice geodésico BEJC, que es de mayor precisión, al estar corregida por gravedad y referida al NMM. Este vértice geodésico pertenece a las redes RGAE y REGID y es el vértice geodésico fundamental en la isla Livingston, utilizado para control horizontal, nivelación y mediciones gravimétricas. Fue instalado durante la campaña 1987/1988. Las coordenadas GPS absolutas de BEJC fueron determinadas con respecto a las estaciones IGS OHI2 y PALM cuya su solución está referida al sistema ITRF2000.0.

Otros puntos de referencia geodésicos en la isla son el vértice BEJ1 y el TGBM TOJO. Estos tres puntos han servido para determinar la cota de nivelación con respecto al nivel medio del mar, respecto a BEJC, y posteriormente determinar la ondulación del geoide (N) en cada uno de ellos. El vértice geodésico BEJ1 fue construido e instalado para reemplazar el anterior, que fue afectado por la construcción de las nuevas instalaciones de la BAE Juan Carlos I.

La marca geodésica de referencia TOJO, es la marca de control del mareógrafo (TGBM) para la estación LIVMAR, está ubicada en caleta Johnson. Para más detalles de la ubicación de las marcas y vértices geodésicos ver la Fig. 2.18.

## 4.6. Resultados en la determinación del geoide

Como resultado de este trabajo hemos obtenido un geoide experimental de preciso para la isla Decepción GeoiDEC14 y tres puntos dotados con ondulación del geoide en isla Livingston, en la zona de aledaña a la BAE Juan Carlos I. La Tabla 4.1 muestra los valores de ondulación del geoide obtenidos para la determinación de GeoiDEC14 con sus errores asociados, obtenidos la aplicación del método desarrollado en la sección 4.3.

| # | STATION | $N_{2014}$ (m) | $\sigma N_{2014}$ (m) | # | STATION | $N_{2014}$ (m) | $\sigma N_{2014}$ (m) | # | STATION | $N_{2014}$ (m) | $\sigma N_{2014}$ (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | LN00 | 18.932 | 0.091 | 35 | LN122 | 18.592 | 0.119 | 69 | EG11 | 18.925 | 0.188 |
| 2 | BEGC | 18.744 | 0.092 | 36 | LN123 | 18.092 | 0.110 | 70 | EG13 | 18.909 | 0.188 |
| 3 | BALL | 19.156 | 0.119 | 37 | LN124 | 18.655 | 0.106 | 71 | EG14 | 18.928 | 0.188 |
| 4 | FUMA | 19.485 | 0.100 | 38 | LN125 | 18.547 | 0.101 | 72 | G02 | 18.467 | 0.188 |
| 5 | PEND | 19.082 | 0.129 | 39 | LN201 | 18.925 | 0.102 | 73 | G03 | 18.493 | 0.188 |
| 6 | COLA | 18.916 | 0.106 | 40 | LN202 | 18.900 | 0.100 | 74 | G04 | 18.555 | 0.188 |
| 7 | GLAN | 19.083 | 0.133 | 41 | LN203 | 18.878 | 0.112 | 75 | G07 | 18.829 | 0.188 |
| 8 | GEOD | 18.905 | 0.111 | 42 | LN301 | 18.976 | 0.140 | 76 | G10 | 18.873 | 0.188 |
| 9 | UCA1 | 18.978 | 0.129 | 43 | LN302 | 18.921 | 0.144 | 77 | G14 | 19.309 | 0.188 |
| 10 | CR70 | 18.963 | 0.145 | 44 | LN303 | 19.141 | 0.128 | 78 | G15 | 19.245 | 0.188 |
| 11 | TELE | 18.986 | 0.168 | 45 | LN401 | 18.390 | 0.101 | 79 | G16 | 19.224 | 0.188 |
| 12 | BOMB | 18.975 | 0.123 | 46 | LN402 | 18.610 | 0.114 | 80 | G17 | 18.831 | 0.188 |
| 13 | GRAV | 18.897 | 0.098 | 47 | LN403 | 19.029 | 0.125 | 81 | G18 | 18.904 | 0.188 |
| 14 | LN101 | 18.934 | 0.093 | 48 | LN404 | 18.721 | 0.116 | 82 | G20 | 18.837 | 0.188 |
| 15 | LN102 | 18.888 | 0.095 | 49 | LN501 | 18.741 | 0.170 | 83 | G21 | 18.782 | 0.188 |
| 16 | LN103 | 18.925 | 0.099 | 50 | LN502 | 18.525 | 0.157 | 84 | G22 | 18.845 | 0.188 |
| 17 | LN104 | 18.958 | 0.108 | 51 | LN503 | 19.041 | 0.162 | 85 | G26 | 18.940 | 0.188 |
| 18 | LN105 | 18.897 | 0.109 | 52 | BR-01 | 18.179 | 0.130 | 86 | G27 | 18.883 | 0.188 |
| 19 | LN106 | 18.943 | 0.101 | 53 | LN601 | 18.682 | 0.155 | 87 | G28 | 19.014 | 0.188 |
| 20 | LN107 | 18.920 | 0.100 | 54 | LN602 | 18.507 | 0.148 | 88 | G31 | 18.823 | 0.188 |
| 21 | LN108 | 18.909 | 0.091 | 55 | LN603 | 18.712 | 0.144 | 89 | G32 | 18.861 | 0.188 |
| 22 | LN109 | 18.910 | 0.095 | 56 | LN604 | 18.144 | 0.145 | 90 | G33 | 18.926 | 0.188 |
| 23 | LN110 | 18.883 | 0.095 | 57 | LN605 | 18.275 | 0.147 | 91 | G34 | 18.905 | 0.188 |
| 24 | LN111 | 18.890 | 0.098 | 58 | LN606 | 19.015 | 0.153 | 92 | G35 | 18.945 | 0.188 |
| 25 | LN112 | 18.944 | 0.100 | 59 | LN607 | 18.349 | 0.177 | 93 | G42 | 18.986 | 0.188 |
| 26 | LN113 | 18.939 | 0.099 | 60 | LN608 | 18.704 | 0.170 | 94 | G43 | 18.920 | 0.188 |
| 27 | LN114 | 18.936 | 0.099 | 61 | EG01 | 19.962 | 0.188 | 95 | G44 | 18.880 | 0.188 |
| 28 | LN115 | 18.611 | 0.108 | 62 | EG02 | 18.803 | 0.188 | 96 | G45 | 18.902 | 0.188 |
| 29 | LN116 | 18.586 | 0.114 | 63 | EG03 | 19.085 | 0.188 | 97 | G48 | 18.986 | 0.188 |
| 30 | LN117 | 18.958 | 0.105 | 64 | EG05 | 19.249 | 0.188 | 98 | G49 | 19.042 | 0.188 |
| 31 | LN118 | 18.363 | 0.112 | 65 | EG06 | 18.874 | 0.188 | 99 | G53 | 18.910 | 0.188 |
| 32 | LN119 | 18.053 | 0.119 | 66 | EG07 | 18.814 | 0.188 | 100 | G55 | 18.859 | 0.188 |
| 33 | LN120 | 18.173 | 0.118 | 67 | EG09 | 18.941 | 0.188 | 101 | G57 | 18.872 | 0.188 |
| 34 | LN121 | 18.688 | 0.120 | 68 | EG10 | 18.888 | 0.188 | 102 | TOCO | 19.009 | 0.104 |

**Tabla 4.1:** Valores de ondulación del geoide y sus errores estimados para GeoiDEC14

El mapa de curvas de ondulación del geoide (N) se obtuvo por el método interpolación de estos datos para toda la isla (Fig. 4.10). Es importante señalar que el mapa de error no contiene información acerca de la exactitud del método de interpolación utilizado y solo muestra los errores de propagación debido al cálculo realizado para la obtención de los diferentes valores altimétricos en cada punto.

Para la interpolación de las curvas aplicamos el método spline de tensión. Este método es más riguroso respecto a la modalidad spline regularizado, pues controla con bastante rigurosidad la superficie de trabajo acuerdo con el carácter del fenómeno modelado y aunque crea una superficie menos suavizada, sin embargo los valores están limitados al rango de la muestra de los datos. El mapa de curvas se obtuvo utilizando el software ArcGIS 9.3 de ESRI.

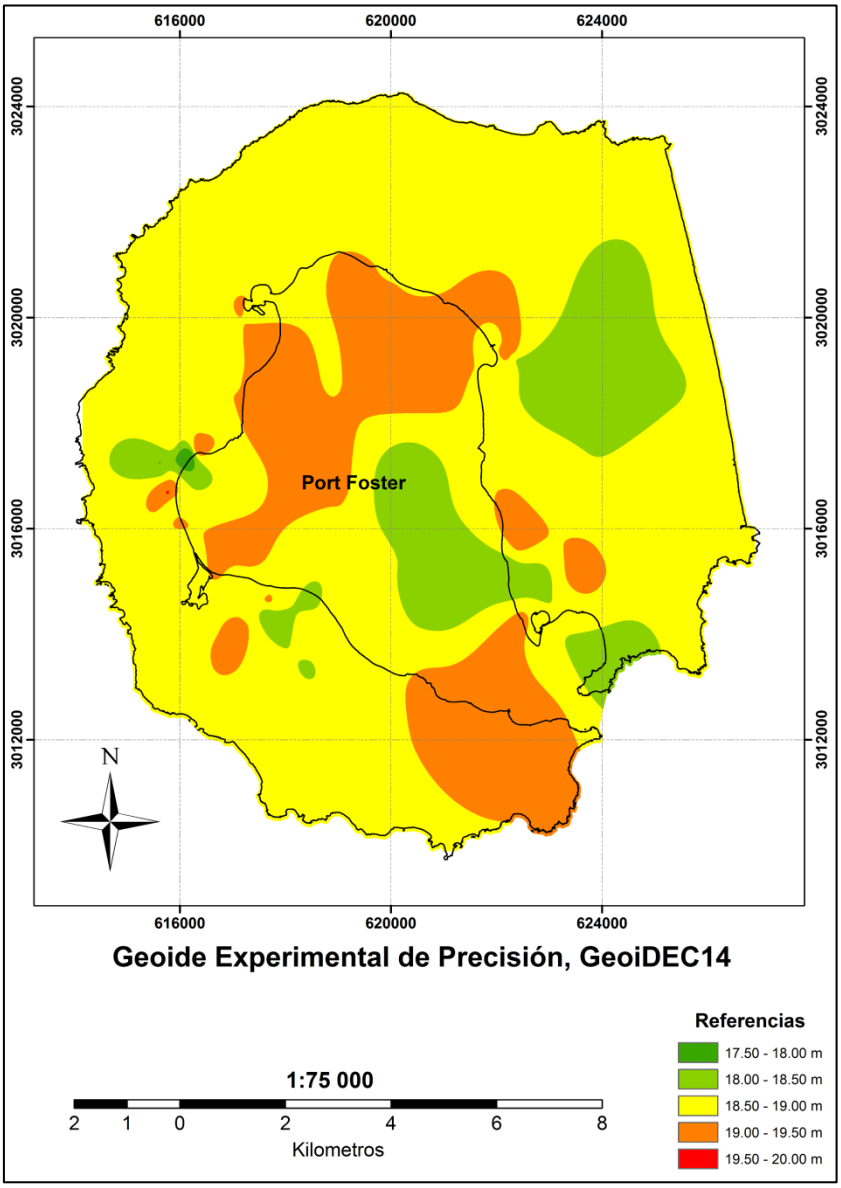



**Figura 4.10:** Geoide experimental de precisión, GeoiDEC14

Aplicando la misma metodología también hemos obtenido el mapa de errores para el mapa de errores (Fig. 4.11). Los errores asociados a cada punto fueron obtenidos aplicando las leyes de la propagación de errores al método de determinación del geoide GPS/nivelación/gravedad, de acuerdo a las ecuaciones 4.16, 4.17 y 4.18.

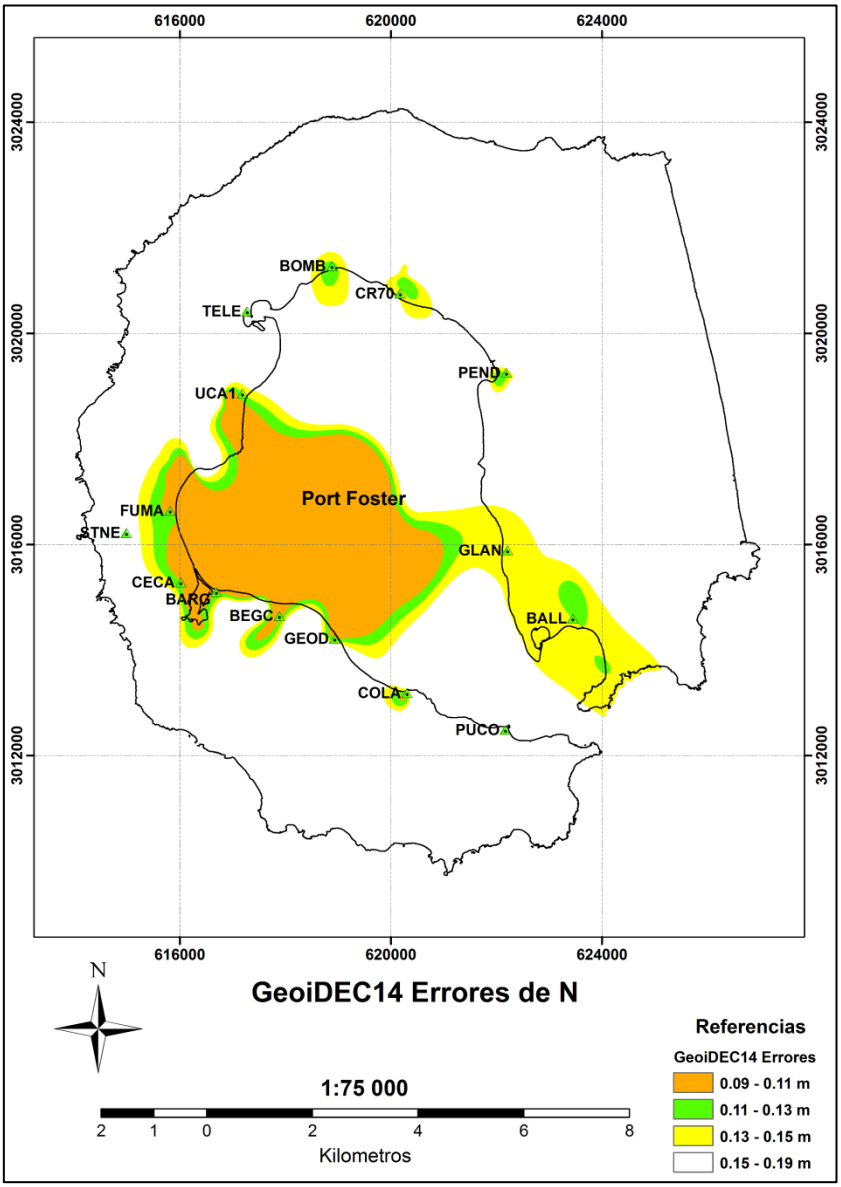



**Figura 4.11 :** Errores obtenidos en la determinación de GeoiDEC14

La Figura 4.11 muestra los errores en metros, obtenidos en la determinación de la ondulación del geoide. Observamos que los mayores errores se obtuvieron en las zonas Cráteres del 70, Caleta Péndulo y Punta Collins, mientras que en la zona de Bahía Balleneros se observó un cambio de tendencia. Esto se puede atribuir a un mejor ajuste de la red RENID en la zona debido a la metodología aplicada para el enlace entre Colatinas y Balleneros. Para realizar el enlace entre Punta Colatinas y Bahía Balleneros aplicamos una metodología mixta (nivelación geométrica y trigonométrica) entre el vértice geodésico COLA (Punta Colatinas) y los puntos de referencia LN604 y BR01 ubicados en la zona de Bahía Balleneros y que ha mejorado la precisión de los resultados obtenidos.

El rango de variación de errores absolutos va desde 0,09 hasta 0,17 metros alrededor de toda la isla. Para obtener los errores absolutos a los errores de nivelación se ha sumado el error obtenido en la determinación del NMM en la estación DECMAR, que es 0,051 metros para el vértice COLA.

Los errores estimados en la determinación de GeoiDEC14 no exceden los 20 cm y pueden agrupados en tres tipos y están relacionados geográficamente a un área concreta de la isla. La tabla 4.2 nos muestra los errores agrupados por área.

| AREA | ERROR (m) |
|---|---|
| Colatinas Point , Gabriel de Castilla Base, Argentine Base, Fumarole Bay, Obsidianas, Pendulum Cove | 0.09 - 0.11 |
| Bombs Field, Craters 70, Black Glacier | 0.11 - 0.15 |
| Telephon Bay, Collins Point, Lobera Beach | 0.15 - 0.19 |

**Tabla 4.2 :** GeoiDEC14, errores estimados agrupados por zonas

También, hemos establecido tres puntos provistos de ondulación del geoide (N), la elevación y coordenadas absolutas GNSS, en el área de la BAE Juan Carlos I y caleta Johnson (isla Livingston). Debido a que estos puntos son muy cercanos su determinación no es relevante para representación cartográfica y no son suficientes para la determinación de un geoide local en esta área. El error estimado en la determinación de la altura con respecto MSL para BEJC era 0.088 metros. Este error fue propagado a todos los puntos y agregado a los errores obtenidos en la nivelación geométrica. La Tabla 4.3 muestra los resultados de estas observaciones en la isla Livingston y la ubicación de las estaciones se muestran en la Fig. 2.18.

| # | STATION | X (m) | Y (m) | $N_{2014}$ (m) | $\sigma N_{2014}$ (m) |
|---|---|---|---|---|---|
| **201** | **BEJC** | 633755.090 | 3049250.005 | 18.808 | 0.052 |
| 202 | **BEJ1** | 633803.084 | 3049258.486 | 18.905 | 0.054 |
| 203 | **TOJO** | 633624.647 | 3049599.424 | 18.917 | 0.068 |

**Tabla 4.3 :** Valores experimentales de N obtenido para isla Livingston

## 4.7. Discusión sobre GeoiDEC14

La importancia de este trabajo radica en que es el primer modelo de un geoide local de precisión obtenido en una zona volcánica activa, como es el volcán Decepción. Este modelo permitirá

realizar trabajos técnicos y científicos y producir resultados con un alto nivel de precisión. Como es un modelo preciso puede técnicamente tener la capacidad de ser utilizado para:

- la calibración de modelos geopotenciales globales,
- la determinación directa de alturas ortométricas combinando el modelo con observaciones GPS,
- en la elaboración de modelos de deformación y en monitoreo de la deformación producida por efectos volcánicos,
- en el diseño de modelos de flujo de lavas y en las previsiones para determinar mapas de peligrosidad y localización de las zonas de riesgo,
- en aplicaciones de oceanografía, control de los niveles del mar, topografía directa con GPS y en aplicaciones geofísicas.

Para la determinación del geoide de isla Decepción GeoiDEC14 las medidas de la gravedad se hicieron en los vértices de la red REGRID, que incluye todos los puntos de la red REGID y RENID. Todos los puntos utilizados están dotados de coordenadas ITRF2000.0 y de altura ortométrica.

Para obtener el modelo GeiDEC14, hemos utilizado la metodología GPS/nivelación/gravedad realizando el cálculo sobre un total de 108 puntos disponibles en toda la isla, distribuidos homogéneamente en la parte interior de la isla alrededor de Puerto Foster. Estos puntos tienen un valor promedio de ondulación del geoide (N) de 18,83 metros con un rango de valores entre 18,05 y 19,49 metros.

Se obtuvieron tres puntos en isla Livingston, todos se encuentran ubicados en la zona entre la BAE Juan Carlos I y caleta Johnson. Estos tres puntos tienen un valor promedio de 18,87 metros, muy similar al promedio obtenido en isla Decepción, dando validez a estos últimos.

Hemos obtenido ondulaciones del geoide (N) de varios modelos geopotenciales globales como el EGM96 (Lemoine et al. 1998), EGM2008 (Pavlis et. Al. 2008), GRACE2003 (Fecher et al. 2015, Pail et al. 2010), GRACE2014 (Mayer-Guerr et al. 2014), además del geoide experimental de isla Decepción determinado en 2007, DEC2007 (Berrocoso et al. 2007, 2008), que nos han servido para comparar y analizar sus diferencias con respecto a nuestro geoide experimental GeoiDEC14.

En la Figura 13, muestra las comparaciones entre las ondulaciones del geoide obtenidas del EGM96, EGM2008, AUIB-Grace2003s y ITSG-Grace2014s. Las ondulaciones han sido obtenidas utilizando las herramientas del Servicio de Cálculo del Centro Internacional de Modelos Global de la Tierra (ICGEM ) y son interpolaciones obtenidos de una cuadrícula de 0,001º.

En la (Fig. 13c y f) los valores de GeoiDEC14 se han introducido en cuadricula del EGM08 y GRACE2014s para ver mostrar su influencia en la generación de los modelos

combinados. Podemos observar que GeoiDEC14 tiene valores más pequeños de N, llegando a los 18,05 metros en algunas zonas, valor no alcanzado por ninguno de los geoides globales estudiados.

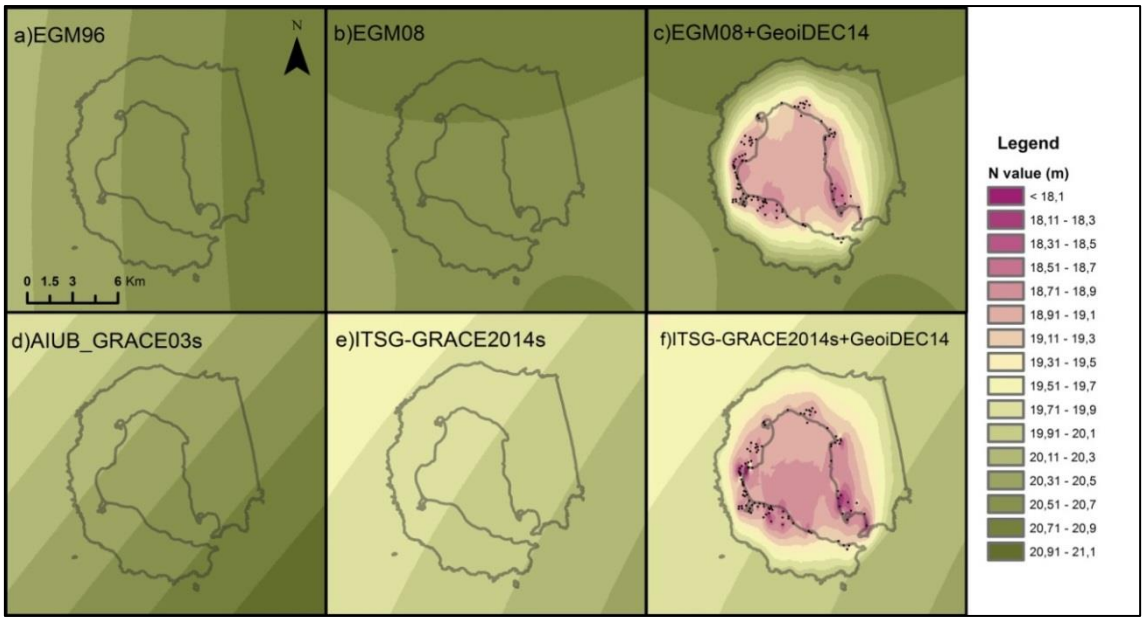



**Figura 4.13:** Valores de N obtenidos para **a)** EGM96 **b)** EGM08 **d)** AIUB_GRACE03s **e)** ITSG-GRACE2014s. **c)** and **f)** muestran los resultados de la inserción de GeoiDEC14 dentro de EGM08 y GRACE2014

En concreto, esta comparación muestra una diferencia máxima del valor de N, en los puntos observados de alrededor de 2,5 m con respecto a los antiguos modelos globales EGM96, GRACE03 y EGM2008 (Fig. 13a, b y d). Respecto a los modelos DEC2007 y GRACE2014 (Fig. 13e) la diferencia es de 1,9 m. Los valores máximos también difieren entre ambos grupos, con el valor máximo en nuestro geoide está entre 0,8 y 1,1 metros con respecto a EGM96, GRACE03 y EGM08 y aumentando a valores de ± 0,3 m, con respecto a DEC2007 y GRACE2014, este último valor estar cerca el error máximo de 0,2 m considerado para el nuevo geoide.

El modelo experimental GeoiDEC2014 generalmente presenta valores más bajos de N con respecto a los geoides comparados y en todos los casos el valor máximo de GeoiDEC14 es menor que el valor promedio de cada geoide comparado. El promedio de los modelos de comparación con respecto a GeoiDEC14 era de -1,7 metros (EGM96, GRACE03 y EGM2008) a -0,9 m (DEC2007 y GRACE2014), mostrando un mejor ajuste en estos dos últimos modelos con respecto a GeoiDEC14. Las desviaciones estándar se mantienen muy similares en todos los modelos globales.

Las diferencias de los cuatro modelos globales de geoide comparados, con respecto al geoide EIGEN6C4, que es el último modelo de geoide publicado por el GFZ (Centro Alemán de

Investigación de Ciencias de la Tierra), no supera 0,15 m en el caso de EGM08 de grado 160, 0.3 m en el peor caso para GRACE2014s de grado 200 y 0,05 m para AIUG-GRACE03s de grado 160. Los datos, que ofrece este Centro son 12.224 puntos GPS/nivelación, que provienen de Canadá, EE.UU., Europa, Japón y Australia, y ofrecen una media cuadrática (rms) de 0.43m, 0,66 m, 0.24m, y 1,05 m para EGM96, AIUG-GRACE03s, EGM2008 y GRACE2014s, respectivamente. Estos datos indican que las diferencias obtenidas de alrededor de 1,5 m no se deben utilizar en los diferentes modelos, debido a que el error típico puede llegar a un máximo de 0,3 m, pero los valores obtenidos en otros lugares del mundo no son tan elevados, con la excepción del geoide GRACE2014s, con el que nuestro modelo presenta menores diferencias. En la Tabla 4.4 se presentan los valores de la comparativa realizada.

| | A. Resumen Estadístico | | | | | | B. Rango de diferencias de N, respecto a GeoiDEC14 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | GeoiDEC14 | DEC2007 | EGM96 | GRACE2003 | EGM2008 | GRACE2014 | dif EG96 | dif GR03 | dif EG08 | dif GR14 | dif DEC07 |
| MAX | 19.49 | 20.37 | 20.69 | 20.70 | 20.73 | 20.08 | -0.96 | -0.81 | -1.12 | -0.32 | 0.26 |
| MIN | 18.05 | 18.77 | 20.44 | 20.23 | 20.57 | 19.78 | -2.51 | -2.52 | -2.57 | -1.90 | -1.85 |
| PROMEDIO | 18.82 | 19.64 | 20.53 | 20.40 | 20.64 | 19.88 | -1.71 | -1.58 | -1.81 | -1.06 | -0.82 |
| SD | 0.26 | 0.28 | 0.08 | 0.13 | 0.05 | 0.08 | 0.28 | 0.30 | 0.26 | 0.28 | 0.23 |
| ES_Max | 0.00 | 4.56 | 4.58 | 4.69 | 2.25 | 3.35 | | | | | |
| ES_Average | 0.00 | 6.45 | 5.97 | 6.86 | 4.00 | 3.10 | | | | | |

**Tabla 4.4: A.** Resumen estadístico de los valores de N (metros) entre los modelos geopotenciales globales y DEC2007 versus GeoiDEC14. B. Diferencias de N entre modelos respecto a GeoiDEC14. ES_Max y ES_Average es el resultado de aplicar el análisis Tamaño del Efecto (ES).

La razón de la existencia de una diferencia más pequeña respecto al modelo experimental DEC2007, podemos decir que se debe a que este modelo fue obtenido utilizando la misma metodología, pero con una menor cantidad de datos y además en el momento de su cálculo y determinación obtención no teníamos un nivel de referencia vertical (NMM) obtenido en base a medidas reales y georreferenciadas, que para el modelo GeoiDEC14 fue obtenido con especificaciones rigurosas y por lo tanto mayor precisión.

Respecto a la proximidad de los valores entre GRACE2014 y GeoiDEC14, esta podría ser debido a la alta resolución de este modelo GRACE2014 (grado 200), que se traduce en una mayor precisión del modelo. La comparación muestra un nivel significativo de mejora en la exactitud de nuestro modelo con respecto a los modelos globales y al modelo experimental anterior de la zona de Decepción.

También hemos realizado un análisis estadístico denominado Tamaño de Efecto (ES, en inglés Effect Size) para llevar a cabo una nueva comparativa entre los diferentes modelos. La estimación de ES se considera una prueba complementaria necesaria de hipótesis entre un modelo cuya validez debe ser probado (M0), en este caso nuestro modelo GeoiDEC14 y los modelos de referencia (M1), en este caso los modelos globales y el modelo DEC2007 (Ledesma et al. 2008). El análisis lo realizamos tomando como parámetros de estudio dos estadísticos, el valor máximo (Max) de cada uno de los modelos, que sería la peor situación que podemos encontrar, y el valor medio (promedio) que sería el valor más representativo de cada modelo. Los modelos donde ES es mínimo serían aquellos que se acerquen más a nuestro modelo patrón

(M0) GeoiDEC14. Los resultados se presentan en la Tabla 4.4, e indican que los valores mínimos corresponden a los modelos GRACE2014 y DEC2007. Con este análisis nuevamente se marca una separación entre los modelos y se confirma que estos son los que tienen la mayor precisión y resolución entre los comparados. Este análisis validaría nuestra hipótesis de que el modelo de geoide local de precisión GeoiDEC14 es el modelo más preciso obtenida hasta la fecha en el área de la isla Decepción.

Por otra parte, la comparación de la distribución de los valores de N en GeoiDEC14, muestra que algunas de sus anomalías coinciden con los puntos calientes de la isla, por ejemplo los valores mínimos se ubican en bahía Fumarolas y bahía Balleneros, que son zonas con presencia de fumarolas. Por otro lado, los valores máximos los podemos encontrar en zonas donde existen restos de flujo de lavas como en Colatinas, Glaciar Negro o Punta Murature. Estas anomalías pueden deberse a las propiedades de la corteza o a la densidad del terreno en la zona (Crescentini y Amoruso, 2007), como también se puede apreciar en la geología de la isla, que se muestra en la Fig. 2.11.

Por último, en isla Livingston, proporcionamos una nueva y más precisa altura ortométrica en las estaciones geodésicas BEJC y BEJ1 y en la estación de control mareógrafo TOJO. En estos puntos posteriormente también se obtuvo la ondulación del geoide (N). Los valores de N obtenidos en Livingston son similares al valor medio obtenido en la isla Decepción, y dado que la isla Livingston no tiene actividad volcánica y los valores de N son muy similares, por lo tanto no se detecta ninguna anomalía en la zona. Aunque estos tres valores obtenidos en Livingston no permiten determinar un geoide en esta pequeña zona; sin embargo, nos sirven para comparar los valores obtenidos en isla Decepción, que al ser similares nos permiten inferir que en ambas islas la estructura de corteza y la distribución de masas no varían significativamente.

Para el presente trabajo, se estudió también la posibilidad de aplicar otras metodologías para la determinación del geoide, entre ellas el método Remove-Restore, sin embargo los resultados obtenidos no fueron muy satisfactorios, siendo similares a los obtenidos por (Berrocoso et al. 2008 ); además, este método es difícil aplicación en la zona debido a la falta de datos y de un Modelo Digital del Terreno (DTM) o un Modelo Digital de Elevación (DEM) preciso, y que sería fundamental para obtener con esta metodología un modelo de geoide resultante de buena precisión.

## Capítulo 5

# Resultados

Los resultados de la presente Tesis Doctoral podemos resumirlos en logros técnicos y resultados de investigación.

En cuanto a los logros técnicos son los siguientes:

- Se ha realizado un diagnóstico y análisis de los datos geodésicos, de nivelación, gravimétricos, oceanográficos y meteorológicos, que se han tomado en las diferentes campañas antárticas, elaborando una base de datos desde la campaña 1989-1990.
- Se han establecido dos estaciones marea, la estación LIVMAR en isla Livingston y DECMAR en isla Decepción que desde febrero de 2011 llevan registrando datos de forma continua.
- Se han monumentado y referenciado, tanto en horizontal como en vertical, todos las marcas geodésicas para control de referencia de mareógrafos (TGBM) y de las marcas auxiliares de referencia de los mareógrafos (TGAR), dotando a estos puntos de coordenadas geodésicas (latitud, longitud, altura elipsoidal, altura ortométrica y ondulación del geoide. Además, estos puntos se encuentran vinculados altimétricamente a puntos de la red REGID.
- Se ha realizado el estudio y análisis de las series temporales de datos de marea que se han tomado en diferentes puntos de las islas, determinando las constituyentes armónicas de marea en las islas Decepción y Livingston, con series de más de dos años de duración.
- Hemos determinado el Nivel Medio del Mar en las estaciones mareográficas de LIVMAR y DECMAR calculado tomando en cuenta los efectos gravimétricos. Hemos trasladado y referido este plano de referencia vertical a los vértices y benchmarks de la redes REGID y RENID.
- Se ha realizado el cálculo de la red gravimétrica REGRID y todos los puntos pertenecientes a la misma han sido corregidos por efectos gravimétricos.
- Se han actualizado las cotas ortométricas de todos lo puntos de las redes REGID, RENID y REGRID, realizando un nuevo cálculo y ajuste de las mismas.
- Hemos calculado y determinado el modelo de geoide local de precisión para isla Decepción, comparando nuestro modelo con modelos globales existentes y vigentes en la zona.

- Para isla Livingston solo hemos determinado tres puntos con todas sus coordenadas y que serán la base y marco geográfico para futuros trabajos, tanto técnicos como científico, en esta isla.

En cuanto a los resultados de investigación, estos se traducen en la publicación de cuatro publicaciones científicas y dos participaciones en congresos internacionales y son las siguientes:

## Publicaciones Científicas.

Capítulo de Libro. En: Book Nonlinear and Complex Dynamics. ( PUBLICADO)
Vidal J., Berrocoso M., Jigena B., ***Hydrodynamic modeling of Port Foster, Deception Island (Antarctica).*** In: Book Nonlinear and Complex Dynamics. Chapter 16, pp 193-206. 2011.

Artículo Antartic Science. ( PUBLICADO)
*Jigena B., Vidal J., Berrocoso M.,* ***Determination of the mean sea level at Deception and Livingston islands, Antarctica.*** *Antarctic Science, Vol 27 (1) pp 101-102, 2014.*

Artículo Dyna. ( PUBLICADO)
Jigena B., Vidal J., Berrocoso M., ***Determination of the tide constituents at Livingston and Deception Islands (South Shetland Islands, Antarctica), using annual time series*****.**
*DYNA 82 (191), pp 209-218, June 2015.*

Artículo Antarctic Science. (ACEPTADO, In Press)
*Jigena B., Berrocoso M., Torrecillas C., Vidal J., Fernández-Ros A., Barbero I.* ***Determination of an experimental geoid at Deception and Livingston Islands (South Shetland Islands, Antarctica).*** *Antarctic Science.*

## Participación en Congresos internacionales.

**XXXIII SCAR Biennial Meetings and Open Science Conference**,
Auckland, New Zealand from 23 August – 3 September, 2014.
*Berrocoso M. , Jigena B., Vidal J., and Prates G.* ***Tidal Gauge Stations at Deception and Livingston Islands (South Shetland Islands, Antarctica), 2007-2014: Determination of the mean sea level and tide constituents, using a long term time series.*** *Poster*

**26th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG)**,
Prague, Czech Republic, from the 22nd of June to the 2nd of July 2015.
*Berrocoso M., Jigena B., Vidal J., Prates G., Gárate J.* ***Establishment of the mean sea level at Deception and Livingston Islands (Antarctica) and application in the determination of a precise local geoid.*** *Poster*

## 5.1 Publicaciones Científicas.

### *Capítulo de Libro. Book Nonlinear and Complex Dynamics*

Vidal J., Berrocoso M., Jigena B. (2011). ***Hydrodynamic modeling of Port Foster, Deception Island (Antarctica).*** In: Book Nonlinear and Complex Dynamics. Applications in Physical, Biological and Financial Systems, Chapter 16, pp 193-206.

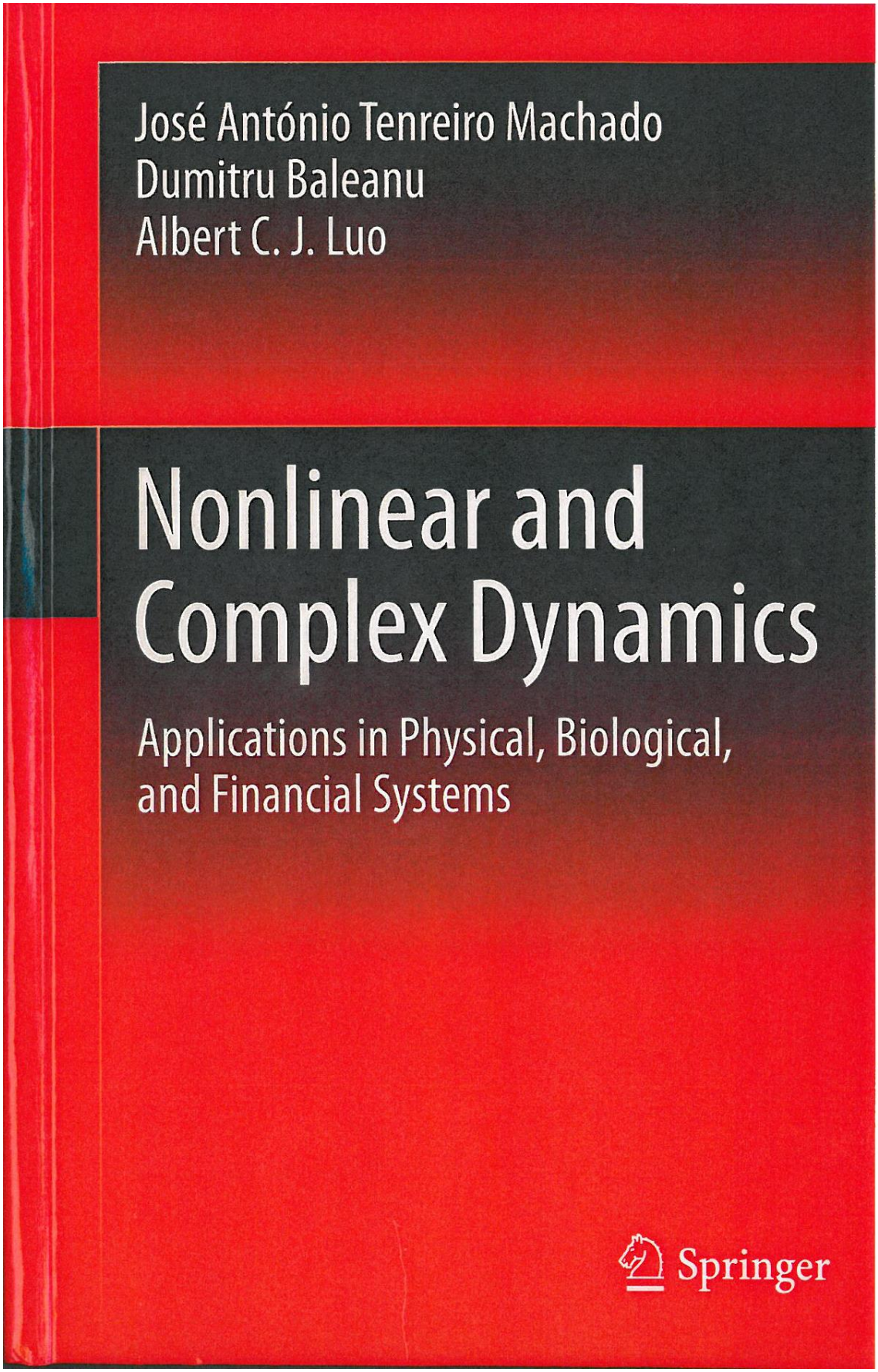
( Publicado)

En esta publicación presentamos la simulación para obtener un modelo del comportamiento hidrodinámico de la bahía de Puerto Foster (isla Decepción, Antártida). La simulación fue realizada con el software para modelamiento hidrodinámico UCAD2 desarrollado en la Universidad de Cádiz. Este software de modelamiento simula un modelo numérico, no lineal, barotrópico y en dos dimensiones y nos permite modelar el comportamiento de la marea en en un determinado entorno, en nuestro caso se implementó y se utilizó para simular el comportamiento de la marea en la Bahía de Puerto Foster, obteniendo como resultado las principales constituyentes de la onda de marea M2; S2; O1 y K1.

El modelo fue validado mediante la comparación de los resultados de la simulación respecto a los niveles de marea de datos tomados "in situ" en varias estaciones que fueron ubicadas alrededor de la bahía de Puerto Foster, en este caso se colocaron sensores de presión en las zonas de Punta Colatinas, Caleta Péndulo y Caleta Balleneros

Con el modelo validado hemos estimado los volúmenes totales de agua que se intercambian entre

Puerto Foster se intercambia y el Estrecho de Bransfield durante el flujo y reflujo de la marea, siendo el volumen total en la Bahía de alrededor de 3500 $Hm^3$ y el volumen de agua que se intercambia en cada marea oscila entre el 1,10% al 2.8%, que serían aproximadamente entre 40 y 100 $Hm^3$


José António Tenreiro Machado
Dumitru Baleanu
Albert C. J. Luo
Nonlinear and Complex Dynamics
Applications in Physical, Biological, and Financial Systems
Springer

José António Tenreiro Machado • Dumitru Baleanu
Albert C.J. Luo

# Nonlinear and Complex Dynamics

## Applications in Physical, Biological, and Financial Systems

Springer

José António Tenreiro Machado
Department of Electrical Engineering
Institute of Engineering of Polytechnic of Porto
Porto, Portugal
jtm@isep.ipp.pt

Albert C.J. Luo
Department of Mechanical and Industrial Engineering
Southern Illinois University
Edwardsville, IL, USA
aluo@siue.edu

Dumitru Baleanu
Faculty of Art and Sciences
Department of Mathematics and Computer Sciences
Cankaya University
Ankara, Turkey
dumitru@cankaya.edu.tr

ISBN 978-1-4614-0230-5 e-ISBN 978-1-4614-0231-2
DOI 10.1007/978-1-4614-0231-2
Springer New York Dordrecht Heidelberg London

Library of Congress Control Number: 2011934799

© Springer Science+Business Media, LLC 2011
All rights reserved. This work may not be translated or copied in whole or in part without the written permission of the publisher (Springer Science+Business Media, LLC, 233 Spring Street, New York, NY 10013, USA), except for brief excerpts in connection with reviews or scholarly analysis. Use in connection with any form of information storage and retrieval, electronic adaptation, computer software, or by similar or dissimilar methodology now known or hereafter developed is forbidden.
The use in this publication of trade names, trademarks, service marks, and similar terms, even if they are not identified as such, is not to be taken as an expression of opinion as to whether or not they are subject to proprietary rights.

Printed on acid-free paper

Springer is part of Springer Science+Business Media (www.springer.com)

# Hydrodynamic Modeling of Port Foster, Deception Island (Antarctica)

**Juan Vidal, Manuel Berrocoso, and Bismarck Jigena**

## 1 Introduction

Deception Island is part of the South Shetland Island chain with Smith, Snow and Livingston Islands to the north and west, and King George Island to the north and east. These islands form the northern boundary of the Bransfield Strait and the Antarctic Peninsula forms its southern boundary. Deception Island is situated between latitudes 62.89–63.02° South and longitudes 60.49–60.75° West. Deception Island is an active volcano that has a central flooded caldera, which is open onto Bransfield Strait through a shallow and narrow sill, at Neptune's Bellows [17].

Bransfield Strait tides are a mixture of diurnal and semidurnal frequencies. The M2 component is the most important with an amplitude around 0.40 m while O1, K1 and S2 tidal components, all with amplitudes around 0.28 m, are also significant [13]. Amplitudes of the main tidal constituents are higher in the northwestern Weddell Sea than at the northwestern side of the peninsula [7]. The local circulation in the Bransfield Strait is strongly influenced by tides. Both at the surface and at deeper layer, the flow patterns exhibit a strong diurnal and semidiurnal periodicity in agreement with the barotropic character of tides [12]. The Bransfield Current is a northeastward geostrophic current. Based on geostrophic studies calculated to a reference level, various authors proved that the currents are oriented parallel to the front with speeds from 0.05 to 0.30 m $s^{-1}$, [14] and [8].

J. Vidal (✉)
Centro Andaluz de Ciencia y Tecnologías Marina, Campus Universitario de Puerto Real, Puerto Real (Cadiz), 11510 Spain
e-mail: juan.vidal@uca.es

J.A.T. Machado et al., *Nonlinear and Complex Dynamics: Applications in Physical, Biological, and Financial Systems*, DOI 10.1007/978-1-4614-0231-2_16,
© Springer Science+Business Media, LLC 2011

5. Bolin, B., Rodhe, H.: A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs. Tellus **25**, 58–62 (1973)
6. Crean, P.B., Murty, T. S., Stronach, J. A.: Mathematical Modelling of tides and Estuarine Circulation: the Coastal Seas of Southern British Columbia and Washington State. Coastal Estuarine Stud. **30**, pp.1-47, Washington (1991)
7. Dragani, W. C., D'onofrio, E. E., Fiore, M. E., Speroni, J. O.: Propagación y amplificación de la marea en el sector norte de la Península Antártica. V Simposio Argentino y Latinoamericano sobre Investigaciones Antárticas, Buenos Aires (2004)
8. Garcia, M. A., Castro, C. G., Rios, A. F., Doval, M. D., Roson, G., Gomis, D., Lopez, O.: Water masses and distribution of physico-chemical properties in the western Bransfield Strait and Gerlache Strait during austral summer 1995/96. Deep-Sea Research II. **49**, 585–602 (2002)
9. Ketchum, B.H.: The exchanges of fresh and salt waters in tidal estuaries. L. Mar. Res. **10**, 18–37 (1951)
10. Lee, J. H., Qian, A.: Three-dimensional modeling of hydrodynamic and flushing in deep bay. International Conference on Estuaries and Coasts November 9-11, Hangzhou (2003)
11. Lenn, Y. D., Chereskin, T. K., Glatts, R. C.: Seasonal to tidal variability in currents, stratification and acoustic backscatter in a Antarctic ecosystem at Deception Island. Deep-Sea Research II. **50**, 1665–1683 (2003)
12. Lopez, O., Garcia, M. A., Sanchez-Arcilla, A. S.: Tidal and residual currents in the Bransfield Strait, Antarctica. Ann Geophysicae. **12**, 887–902 (1994)
13. Lopez, O., Garcia, M. A., Gomis, D., Rojas, P., Sospedra, J, Sanchez-Arcilla, A. S.: Hydrographic and hydrodynamica. characteristics of the eastern basin of the Bransfield Strait (Antartica). Deep-Sea Research I. **46**, 1755–1778 (1999)
14. Niiler, P. P., Amos, A., Hu, J. H.: Water masses and 200m relative geostrophic circulation in the western Bransfield Strait region. Deep-See Research A. **38**, 943–959 (1991)
15. Officer, C.B., Kester, D.R.: On estimating the non-advective tidal exchanges and advective gravitational circulation exchanges in an estuary. Estuarine, Coastal and shelf Science. **32**, 99–103 (1991)
16. Padman, L., Fricker, H. A., Coleman, R., Howard, S., Erofeeva, L.: A new Tide Model for the Antarctic Ice and Seas. Annals of Glaciology. **3**, 1–14 (2002)
17. Smith, K. L. Jr., Baldwin, R. J., Kaufmann, R. S., Sturz, A.: Ecosystem studies at Deception Island, Antartica: an overview. Deep-See Research II. **50**, 1595– 1609 (2003)
18. Vidal, J.: Caracterización dinámica de la marea y del sedimento en el canal de Sancti Petri. Ph. D. Thesis, Universidad de Cádiz, Cádiz (2002)
19. Vidal, J., Berrocoso, M., Fernandez, A.: Study of the tide in Deception and Livingston Islands (Antarctica). Antarctic Science. **in press**, (2010)
20. Wijeratne, E.M.S., Rydberg, L.: Modelling and observations of tidal wave propagation, circulation and residence times in Puttalam Lagoon, Sri Lanka. Estuarine Coastal and Shelf Science. **74**, 697–708 (2007)

# HYDRODYNAMIC MODELING OF PORT FOSTER, DECEPTION ISLAND (ANTARCTICA)

**Juan Vidal** * **Manuel Berrocoso** ** **Bismarck Jigena** **

* *Centro Andaluz de Ciencia y Tecnologías Marina, Campus Universitario de Puerto Real, Puerto Real (Cadiz) 11510 Spain (e-mail: juan.vidal@uca.es).*
** *Laboratorio de Astronomía, Cartografía y Geodesia, Facultad de Ciencias, Campus Universitario de Puerto Real, Puerto Real (Cadiz) 11510 Spain.*

**Abstract:**
A numerical, non-linear, barotropic, two-dimensional tidal model was implemented and used to simulate the $M_2, S_2, O_1$ and $K_1$ constituents in Port Foster (Deception Island, Antarctica). The model has been validated by comparing the simulation results against measured water levels data collected in several stations inside the domain. Once the model has been validated, the total volumen of Port Foster is exchanged with Bransfield Strait during the flood and the ebb tide have been estimated.

Keywords: Deception Island, model, Tides, Antarctica.

## 1. INTRODUCTION

Deception Island is part of the South Shetland Island chain with Smith, Snow and Livingston Islands to the north and west, and King George Island to the north and east. These islands form the northern boundary of the Bransfield Strait and the Antarctic Peninsula forms its southern boundary. Deception island is situated between latitudes 62.89 - 63.02 degrees South and longitudes 60.49 -60.75 degrees West. Deception Island is an active volcano that has a central flooded caldera, which is open onto Bransfield Strait through a shallow and narrow sill, at Neptune's Bellows, Smith Jr. et al (2003).

Bransfield Strait tides are a mixture of diurnal and semidurnal frequencies. The M2 component is the most important with an amplitude around 0.40 m while O1, K1 and S2 tidal components, all with amplitudes around 0.28 m, are also significant, Lopez et al (1999). Amplitudes of the main tidal constituents are higher in the northwestern Weddell Sea than at the northwestern side of the peninsula, Dragani et al (2004). The local circulation in the Bransfield Strait is strongly influenced by tides. Both at the surface and at deeper layer, the flow patterns exhibit a strong diurnal and semidiurnal periodicity in agreement with the barotropic character of tides, Lopez et al (1994). The Bransfield Current is a northeastward geostrophic current. Based on geostrophic studies calculated to a reference level, various authors proved that the currents are oriented parallel to the front with speeds from 0.05 to 0.30 $ms^{-1}$, Niiler et al (1991) and Garcia et al (2002).

However, Port Foster water mass characteristics differ significantly from Bransfield Strait water mass characteristics, indicating that the sill at Neptunes Bellow limits cross-sill exchange below 30 m. The small tidal currents in Port Foster, less than $0.1ms^{-1}$, also suggest that the larger Bransfield Strait tidal currents do not direct water into Deception Island, Lenn et al (2003). The maximun tidal currents are obtained at Neptune's Bellows, with 0.64 $ms^{-1}$ during spring tides, Antarctic Pilot (1994).

Several hydrodynamical numeric models, including the Bransfield Strait have been recently implemented by several authors, Dragani et al (2004) and Padman et al (2002). However, these models are larger in scale.

The main objectives of this paper are to present a detailed study of the tidal characteristics in Por Foster. The tidal simulations are a first step towards the modeling of the whole island circulation.

The amplitudes and phases obtained through the analysis of the times series generated by the model allowed the attainment of co-tidal maps and ellipses of currents maps; these results were compared with the harmonic constants of several coastal stations, which positions are given in Fig 1. Based on the tidal maps, characteristics of the tidal propagation in the area are discussed.

## 2. MODEL APPROACH

The hydrodynamic model UCA2D here applied has been developed at University of Cadiz. A completed description of the model can be found in Alvarez (1999) . It has already been applied successfully to several coastal enviroments. See, Alvarez et al. (1997), Alvarez et al (1999) and Vidal (2002).

### *2.1 Governing equations*

The model resolves the equations in their formulations with water levels and transports:

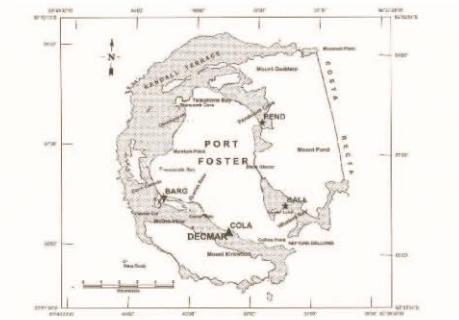



Fig. 1. Tidal Stations in Deception Island: (BALL) Balleneros Station, (COLA) Colatinas Sation and (PEND) Pendulo station

$$\frac{\partial U}{\partial t} - fV + gH\frac{\partial \zeta}{\partial x} + RU + X = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + fU + gH\frac{\partial \zeta}{\partial y} + RV + Y = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

where f is the Coriolis parameter, $\zeta$ is the water level, g is the gravitational acceleration, $H = h + \zeta$ is the total water depth, and U and V are the vertically-integrated velocities. R is the friction coefficient which is expresed as:

$$R = C_b \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{H} \quad (4)$$

where $C_b$ is the bottom drag coefficient. The terms X and Y of equations contain the nonlinear terms:

$$X = u\frac{\partial U}{\partial x} + v\frac{\partial U}{\partial y} - A_H(\frac{\partial^2 U}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 U}{\partial^2 y}) \quad (5)$$

$$Y = u\frac{\partial V}{\partial x} + v\frac{\partial V}{\partial y} - A_H(\frac{\partial^2 V}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 V}{\partial^2 y}) \quad (6)$$

where the last terms in equations represent the horizontal turbulent diffusion and $A_H$ is the horizontal eddy viscosity.

At the open boundaries the water levels are prescribed in accordance with the Dirichlet condition, while at the closed boundaries the normal velocity is set to zero and the tangencial velocity is a free parameter.

## 3. APPLICATION TO PORT FOSTER

### *3.1 The model setup*

The numerical computation has been carried out on a spatial domain that represents Port Foster through a finite element grid which consists of 7980 rectangular elements with a resolution of 100 m x 100 m (Figure 2). The bottom drag coefficient has been set to $cd = 3.0 \cdot 10^{-3}$. In barotropics models, the bottom drag coefficient is usually determined by fitting the modeled M2 tidal elevation and the observations as tide gauge stations, Crean et al (1988). All simulations presented in this work have been carried out using a maximum time step of 5 s.

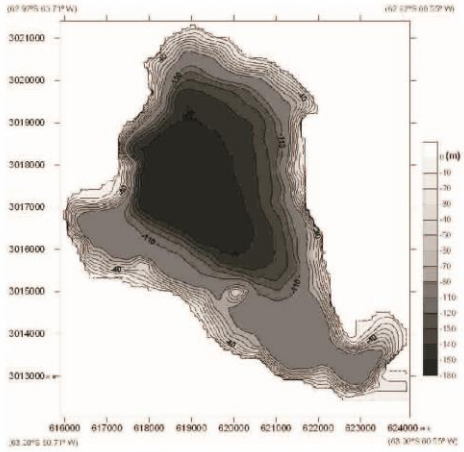



Fig. 2. Grid of Port Foster

The open boundary oscillations of the model consider components M2, S2, O1 and K1,that represent more than 90 % of the tidal energy in Port Foster, Lopez et al (1999). We use the amplitude and phase of the major tidal constituents from Antarctic Tide Gauge Database (http:www.esr.org) at the oceanic border.

For simulations of tidal velocities all variables, including sea levels and velocities were initially set to zero, and the model was forced at the open boundary by specifying the sea level as above.

### *3.2 Water level*

The model has been validated comparing the amplitudes and phases of the major components generated by the model with those derived from harmonic analysis of the tide gauge data within the island Vidal et al (2010).

For each constituent of each simulation, the error in the amplitudes ($e_A$) and the error in the phases ($e_F$) were calculated using (7) and (8)

$$e_A = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_i (Ao_i - Am_i)^2/2} \quad (7)$$

$$e_F = \frac{1}{N}\sum_i A_{mi}^2(\theta_{oi} - \theta_{mi})/(\Sigma_i A_{mi}^2) \quad (8)$$

where the error in the amplitudes was calculated from the difference between the observations ($Ao$) and the results ($Am$) of the model, and the error in the phases was calculated from their difference ($\theta_{oi} - \theta_{mi}$), but weighted with the values of the observed amplitudes ($Am$).

## 4. RESULTS

Table 1 presents the comparison of the analysis of model results (M) with harmonic constants (O) of coastal stations (Balleneros, Pendulo and Colatinas). The tidal amplitudes are in meters and the phases angle are in degrees relative to local time.

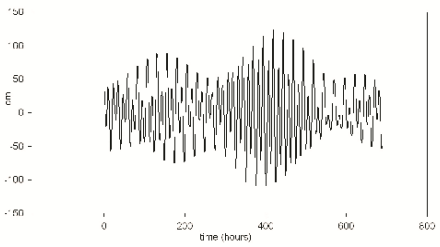



Fig. 3. Tidal elevation data obtained by the model

Model results show that the amplitudes of the components decrease as they spread into the caldera from the ocean, through Neptune's Bellows. The phase lags are also important in this area due to increased friction. Inside Port Foster, where depths are around 100 meters deep, the amplitudes and phase lags do not vary significantly.

The most important results obtained by modeling are that the amplitudes of the velocities are very low (less than $5cm/s$) within Port Foster, excluding the area of Neptune's Bellows. The velocities near the narrow channel of Neptune's Bellows shows that the east-west direction is more important than the north-south, coinciding with the orientation of the narrow passage. For this area, through which it produces all the water exchange between the caldera and the open ocean, the results for simulations of tidal velocities show maximum speeds of $0.76m/s$ during spring tides. Table 2 shows the amplitudes of the velocities for the east-west components of the main harmonic constituents in a center point of the narrow and near Cola Station.

The volume of the basin is approximately $3500Hm^3$ and the cross-section at Neptune's Bellows is about $6000m^2$. Figure 3 shows tidal elevation data obtained by the model at Neptune's Bellows. A mean tidal level variation is about 1.20 meter. A height of 1.20 m implies that about 1.10% of the total volumen of Port Foster is exchanged with Bransfield Strait during the flood and the ebb tide. The maximum range, defined as the largest difference (at spring) between a maximum and the next minimum, is around 2.20m. For the case of spring tides, this amount is approximately 2.8% of the total volume.

## 5. CONCLUSION

The tide in Port Foster was satisfactorily reproduced for all cases studied in this work. Currents obtained with the model are very small inside, with maximum values of $0.76m/s$ in the area of the Neptune's Bellows.

Port Foster in Deception Island has a rate of poor water exchange (1% volume exchange over each tidal cycle). The region where most of the tidal energy is dissipated is the Neptune's Bellows. Approximately 90% of the total energy dissipates in this area.

Table 1. Elevations: Harmonic analysis results

| Station | Ball | | Pend | | Cola | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | O | M | O | M | O | M |
| M2 | | | | | | |
| A(m) | 0.46 | 0.39 | 0.44 | 0.39 | 0.40 | 0.40 |
| $\theta$ (degrees) | 280 | 284 | 281 | 285 | 281 | 283 |
| S2 | | | | | | |
| A(m) | 0.28 | 0.26 | 0.29 | 0.26 | 0.26 | 0.26 |
| $\theta$ (degrees) | Not Obs. | 356 | Not Obs | 357 | 351 | 355 |
| O1 | | | | | | |
| A(m) | 0.29 | 0.27 | 0.29 | 0.27 | 0.27 | 0.27 |
| $\theta$ (degrees) | 48 | 55 | 55 | 55 | 53 | 54 |
| K1 | | | | | | |
| A(m) | 0.26 | 0.30 | 0.26 | 0.30 | 0.30 | 0.30 |
| $\theta$ (degrees) | 66 | 75 | 73 | 75 | 74 | 75 |
| error | | | | | | |
| $\varepsilon_A$ | | 0.03 | | 0.03 | | 0.00 |
| $\varepsilon_F$ | | 2 | | 1 | | 1 |

Table 2. Velocities: Harmonic analysis results

| Station | Neptuno's Bellows | Cola |
|---|---|---|
| M2 | | |
| A($m/s$) | 0.40 | 0.10 |
| $\theta$ (degrees) | 27 | 33 |
| S2 | | |
| A($m/s$) | 0.25 | 0.07 |
| $\theta$ (degrees) | 90 | 98 |
| O1 | | |
| A($m/s$) | 0.13 | 0.05 |
| $\theta$ (degrees) | 148 | 156 |
| K1 | | |
| A($m/s$) | 0.15 | 0.06 |
| $\theta$ (degrees) | 166 | 179 |

## ACKNOWLEDGEMENTS

This work was possible thanks to the project CGL2005-0789-C03-01/ANT INVESTIGACIONES GEODESICAS, GEOFISICAS Y DE TELEDETECCION EN LA ISLA DECEPCION Y SU ENTRONO (PENINSULA ANTARTICA, ISLAS SHETLAND DEL SUR), financed by Spanish Ministry of Science and Technology through the National Program of Antarctic Research of Natural Resources We would also like to thank the Las Palmas Crew and the members of the Spanish Antarctic Station Gabriel de Castilla for their collaboration during the surveying campaigns.

## REFERENCES

O. Alvarez. Simulación numérica de la dinámica de marea en la Bahía de Cádiz: análisis de las constituyentes principales, interacción marea-brisa e influencia del sediemnto en suspensión. *Ph. D. Thesis*, Universidad de Cádiz, Cádiz, 1999.

O. Alvarez, A. Izquierdo, B. Tejedor, R. Maanes, L. Tejedor and B.A. Kagan. The Influence of Sediment

Load on Tidal Dynamics, a Case Study: Cadiz Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 48:439–450, 1999.

O. Alvarez, B. Tejedor and L. Tejedor. Simulación hidrodinámica en el rea de la Bahía de Cádiz. Análisis de las constituyentes principales. *IV Jornadas Espaolas de Puertos y Costas.*, pages 125–136. Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia, Valencia,1997.

J. Vidal. Caracterización dinámica de la marea y del sedimento en el canal de Sancti Petri. *Ph. D. Thesis*, Universidad de Cádiz, Cádiz, 2002.

Y. D. Lenn, T. K. Chereskin and R. C. Glatts Seasonal to tidal variability in currents, stratification and acoustic backscatter in a Antarctic ecosystem at Deception Island. *Deep-Sea Research II*,50:1665–1683, 2003

O. Lopez,M. A. Garcia, D. Gomis, P. Rojas, J. Sospedra and A. Sanchez-Arcilla. Hydrographic and hydrodynamica. characteristics of the eastern basin of the Bransfield Strait (Antartica). *Deep-Sea Research I*, 46:1755–1778, 1999.

W. C. Dragani, E. E. D'onofrio, M. E. Fiore and J. O. Speroni. Propagación y amplificación de la marea en el sector norte de la Península Antártica. *V Simposio Argentino y Latinoamericano Sobre Investigaciones Antárticas*, Buenos Aires, 2004.

Antartic Pilot. Comprising the coasts of Antartica and all Islands Southward of the Usual Route of Vessels, 4th Edition *Hydrographer of the Navy, Taunton, Somerset*, 1994.

M. A. Garcia, C. G. Castro, A. F. Rios, M. D. Doval, G. Roson, D. Gomis and O. Lopez. Water masses and distribution of physico-chemical properties in the western Bransfield Strait and Gerlache Strait during austral summer 1995/96. *Deep-Sea Research II*,49:585–602, 2002.

K. L. Jr. Smith, R. J. Baldwin, R. S. Kaufmann and A, Sturz. Ecosystem studies at Deception Island, Antartica: an overview. *Deep-Sea Research II*, 50:1595– 1609, 2003.

O. Lopez, M. A. Garcia and A. S. Sanchez-Arcilla. Tidal and residual currents in the Bransfield Strait, Antarctica. *Ann Geophysicae* 12:887–902, 1994.

P. P. Niiler, A. Amos and J. H. Hu. Water masses and 200m relative geostrophic circulation in the western Bransfield Strait region. *Deep-Sea Research A*, 38:943–959, 1991.

L. Padman, H. A. Fricker, R. coleman, S. Howard and L. Erofeeva A new Tide Model for the Anatarctic Ice and Seas. *Annals of Glaciology*, 3:1–14, 2002.

J. Vidal, M. Berrocoso and A. Fernandez Study of the tide in Deception and Livingston Islands (Antarctica). *Antarctic Science*, in press, 2010.

P.B. Crean, T. S. Murty and J. A. Stronach Mathematical Modelling of tides and Estuarine Circulation: the Coastal Seas of Southern British Columbia and Washington State. *Coastal Estuarine Stud*,30:471pp. Edited by M. J. Bowman et al, Washinton, 1991.

Appendix A. MODEL VELOCITIES

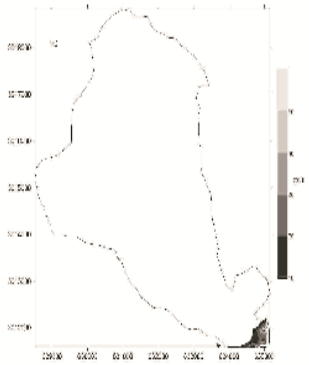


Fig. A.1. M2 velocities

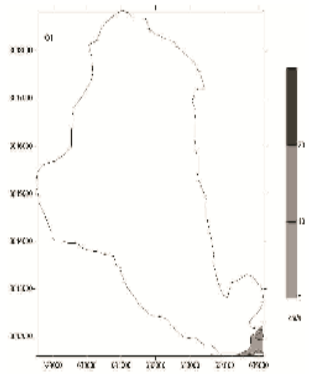


Fig. A.2. O1 velocities

***Artículo Científico Antarctic Science. ( Publicado)***

*Jigena B., Vidal J., Berrocoso M.* ***Determination of the mean sea level at Deception and Livingston islands, Antarctica. Antarctic Science,Vol 27(1), pp 101-102, 2014.***

Durante las campañas antárticas 2010-2011, 2011-2012 y 2012-2013 el Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía de la Universidad de Cádiz (LAGC-UCA), se realizaron las primeras observaciones de un ciclo completo de mareas, obteniendo continuos de más de dos años de observación datos, en las estaciones mareográficas DECMAR (Isla Decepción) y LIVMAR (isla Livingston. Los niveles de marea fueron, por primera vez referenciado altimétricamente a los vértices geodésicos de BEJC en isla Livingston y COLA y LN00 en isla Decepción, todos pertenecientes a la red REGID y/o red RENID, siendo este el primer trabajo de mareas donde los datos referenciados altimétricamente y además corregidos por efectos gravimétricos. Con estos datos se determinó la cota ortométrica (H) en los tres vértices geodésicos, referida al Nivel Medio del Mar obtenido en cada estación mareográfica, definiendo al bechmark LN00 como Punto Fundamental de Altimetría en Isla Decepción.

En este artículo se presentan los resultados de estas observaciones que incluyen el análisis de las series temporales obtenidas en las islas de Decepción y Livingston, la determinación de los niveles del mar en lo vértices geodésicos de referencia.

*Antarctic Science* page 1 of 2 *(2014)* © Antarctic Science Ltd 2014 doi:10.1017/S0954102014000595

# Short Note
# Determination of the mean sea level at Deception and Livingston islands, Antarctica

**BISMARCK JIGENA[1], JUAN VIDAL[1] and MANUEL BERROCOSO[2]**

[1]*Department of Applied Physics, University of Cádiz, CP 11510, Puerto Real, Cádiz, Spain*
[2]*Department of Mathematics, University of Cádiz, CP 11510, Puerto Real, Cádiz, Spain*
*bismarck.jigena@gm.uca.es*

Received 5 March 2014, accepted 16 June 2014

## Introduction

According to Dragani *et al.* (2004), the first observations of the sea levels at Deception Island were made in 1991. Tidal data were obtained over four days in summer by a visual tide staff located near the Decepción Station (Argentina) geodetic benchmark (BARG). This geodetic benchmark, belonging to the Deception Island geodetic network (REGID), was used as the vertical and horizontal datum. Based on these tidal data, an orthometric height value of 2.547 m for the BARG was calculated. This orthometric level was translated by geometric levelling to the point LN00, the fundamental point of the levelling network of Deception Island (RENID); the mean sea level obtained relative to LN00 was 5.430 m. Later, Vidal *et al.* (2012) calculated mean sea levels (MSLs) with respect to vertices of the REGID corresponding to tidal data registered during three months in the 2007–08 Antarctic campaign at DECMAR (Deception Island) and LIVMAR (Livingston Island) stations. The results of new tidal observations for two years on Deception and Livingston islands are presented here.

## Instrumentation and data

Data were obtained using two moorings, each with a SAIV TD304 bottom pressure sensor at points near the coast, obtaining average local values of depth of the tide gauge of 3.147 m at Deception Island and 7.475 m at Livingston Island. The tidal observations at DECMAR and LIVMAR stations were made between February 2011 and April 2013.

Pressure ($P$), temperature ($T$) and conductivity ($C$) data were recorded at the stations with a CTD SAIV SD 204 sensor that has an accuracy of ± 0.02 ppt for salinity, $S$, (derived from $P$, $T$ and $C$) and ± 0.01°C for $T$. Additionally, AQUAlogger 520 PT were used. These sensors have an accuracy of ± 0.05°C for $T$ and 0.005% of full scale (10 m) for $P$. The geometric levelling was made using a Leica model NA2 optical level with an accuracy of ± 0.7 mm for one kilometre double run levelling. The GPS data for positioning of benchmarks and stations were taken from Vidal *et al.* (2012). The gravimetric observations were made with a LaCoste & Romberg model D-203 relative gravimeter.

## Methodology

To convert hydrostatic pressure into a sea level equivalent height $P = P_a + \rho g h$ was used, where $P$ is the pressure registered by the sensor of the tide gauge, $P_a$ is the atmospheric pressure, $g$ is the acceleration due to gravity (average value calculated for Deception Island is 9.822083 m s$^{-2}$) and $\rho$ the density of the water in the study area, calculated using the records of $T$ and $S$.

Vidal *et al.* (2012) used a constant reference value of 990.8 mb (hPa) as $P_a$ which corresponds to the average value of $P_a$ in the region during the period 1978–89 (Rakusa-Suszczewski *et al.* 1992). The sea level for any particular time can be corrected by adding or subtracting the changes caused by $P_a$ changes on the reference values: at low enough frequency the correction is *c.* -1 cm of sea surface height for every +1 mb (hPa) of $P_a$ (Chelton & Enfield 1986). For this study, records of $P_a$ were taken concurrently with the tidal measurements, obtaining average values of 988.39 mb at Deception Island and 987.27 mb at Livingston Island.

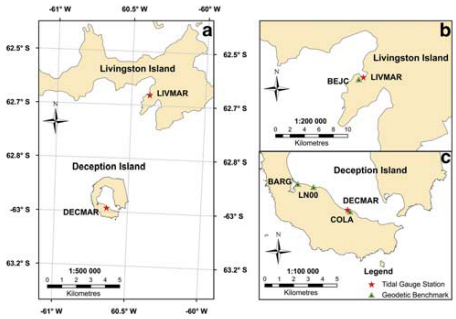



**Fig. 1a.** Location of tidal station. **b.** Detailed map of Livingston Island showing the location of LIVMAR and BEJ1. **c.** Detailed map of Deception Island showing the location of DECMAR, COLA, LN00 and BARG.

**Table I.** Results of linear fit between instantaneous measurements of sea level at DECMAR and LIVMAR. Depth measured by tide gauge, height measured with visual tide staff and optical level relative to tide gauge benchmark (TGBM).

| | DECMAR | LIVMAR |
|---|---|---|
| Depth, tide gauge sensor height (m) | 4.14 | 8.76 |
| XY standard error (m) | 0.05 | 0.08 |
| Mean tide gauge series (m) | 3.15 | 7.48 |
| MSL relative to TGBM (m) | 0.99 ± 0.05 | 1.28 ± 0.08 |

Sea level measurements were linked to fixed onshore benchmarks by comparing simultaneous readings of the gauges against a previously levelled shore-based tidal staff. Using precise geodetic levelling, the height of tide gauge benchmarks (TGBM) were calculated relative to the height of nearby geodetic stations, COLA (Deception Island) and BEJC (Livingston Island) (Fig. 1). Both geodetic stations have absolute coordinates in *X*, *Y*, *Z* and ellipsoidal height (*h*) relative to ITRF2000 (Berrocoso *et al.* 2007).

The instantaneous MSL measurements with visual tide staff were only carried out on days with no wind or waves (calm sea) for 1 hour with 10 minutes sampling. For DECMAR station, a total of seven days and 59 measurements distributed during the sea level recording period were acquired. The same procedure was followed for LIVMAR, with controls during three days with a total of ten measurements.

The gravimetric connection between the South American continent and the South Shetland Islands, was taken from Berrocoso *et al.* (2007). The orthometric heights (*H*) may be calculated from the ellipsoid height (*h*) obtained from the GPS measures, absolute gravity measures (*g*) and the geometric levelling differences (*Δn*), (Berrocoso *et al.* 1996, 2007).

## Results

Table I shows the overall linear fit between the visual measurements and the bottom pressure gauge data at DECMAR and LIVMAR, having obtained centimetre accuracy and a very good linear correlation in the correction.

**Table II.** Results obtained from geodetic benchmarks used at DECMAR and LIVMAR. Mean sea level (MSL) in metres referenced to tide gauge benchmark (TGBM).

| | DECMAR | | LIVMAR |
|---|---|---|---|
| | COLA | LN00 | BEJC |
| h (m) | 47.985 ± 0.002 | 25.069 ± 0.002 | 32.350 ± 0.001 |
| Δn (m) | 29.047 ± 0.003 | 6.200 ± 0.007 | 12.418 ± 0.003 |
| N (m) | 18.966 ± 0.037 | 18.932 ± 0.056 | 19.832 ± 0.017 |
| H (m)* | 29.05 ± 0.09 | 6.20 ± 0.11 | 12.42 ± 0.10 |

h = ellipsoid height, Δn = geometric levelling differences, N = undulation of the geoid, H = orthometric height.
*Calculated value for the H error (σH) includes the MSL error.

Table II shows the relationship of the tide gauges with respect to the benchmark geodetic vertices. The orthometric heights (*H*) are indicated and the undulation of the geoid (*N*) are calculated for Livingston Island (BEJC) and for Deception Island (COLA and LN00). The MSL at geodetic reference stations are also shown.

## Discussion

The achievement of this work with respect to the results of Vidal *et al.* (2012) can be summarized as follows: i) the MSL was calculated based on a long-term time series (more than two years of records), versus the seasonal series of only three months of records, ii) the orthometric height of the geodetic reference benchmarks were obtained and a new, more accurate orthometric height is provided for geodetic vertex LN00, iii) more accurate values were obtained for the reference benchmarks, the difference being + 0.06 m for BEJC and + 0.20 m for COLA relative to values in Vidal *et al.* (2012).

## Acknowledgements

This work was made possible by the support of the following projects: CGL2007-28768-E/ANT, CTM2008-03113-E/ANT and CTM2009-07251/ANT of the Spanish Ministry of Science and Innovation.

## Author contribution

Research design: MBD, JVP, BJA. Data collection (participating in the Spanish Antarctic campaigns 2009–10, 2010–11, 2011–12, 2012–13): BJA, JVP, MBD. Data processing and manuscript preparation: BJA, JVP, MBD.

## References

Berrocoso, M., Garate, J., Martín-Dávila, J., Fernandez-Ros, A., Jigena, B. & Moreu, G. 1996. Improving the local geoid with GPS. Report 96-2. Masala: Finnish Geodetic Institute.

Berrocoso, M., Enríquez De Salamanca, J.M., Ramírez, M.E., Fernández-Ros, A. & Jigena, B. 2007. Determination of a local geoid for Deception Island. *In* Cooper, A., Raymond, C. & the 10th ISAES team, *eds. Antarctica: a keystone in a changing world.* Washington, DC: The National Academies Press, Extended Abstract 123, 4 pp.

Chelton, D.B. & Enfield, D.B. 1986. Ocean signals in tide gauge records. *Journal of Geophysical Research*, **91**, 9081 9098.

Dragani, W.C., Drabble, M.R., D'Onofrio, E.E. & Mazio, C.A. 2004. Propagation and amplification of tide at the Bransfield and Gerlache straits, northwestern Antarctic Peninsula. *Polar Geoscience*, **17**, 156 170.

Rakusa-Suszczewski, S., Mietus, M. & Piasecki, J. 1992. Pogoda i klimat. *In* Rakusa-Suszczewski, S., *ed. Zatoba Admiralicji Antarktyki.* Dziekanów Les'ny: Poland Institut Ekologii PAN, 41 50.

Vidal, J.M., Berrocoso, M. & Fernández-Ros, A. 2012. Study of tides and sea levels at Deception and Livingston islands, Antarctica. *Antarctic Science*, **24**, 193 201.

***Artículo Científico Dyna. ( Publicado)***

*Jigena B., Vidal J., Berrocoso M.* ***Determination of the tide constituents at Livingston and Deception Islands (South Shetland Islands, Antarctica), using annual time series. DYNA 82 (191), pp. 209-218, june 2015 .***

El objetivo principal de este trabajo es presentar un estudio detallado de los constituyentes de marea obtenidos en las estaciones mareográficas DECMAR (isla Decepción) y LIVMAR (isla Livingston).

En diciembre de 2007 se fondearon dos mareógrafos de presión en estas islas y que fueron la base para el establecimiento de las estaciones mareográficas. Desde esa fecha estas estaciones registraron datos de marea, aunque de forma discontinua y solo de algunos días del verano austral, pero desde febrero de 2011 hasta abril de 2013 se obtuvieron dos series temporales completas con registros continuos de más de dos años de observación. Los datos fueron obtenidos mediante sensores de presión que fueron cercanos a la líneas de costa, menos de 40 metros, para minimizar los errores en la posterior referenciación de los sensores respecto al benchmark de referencia. Las medidas de marea fueron referenciadas a un benchmark de referencia en tierra denominado benchmark de control de mareógrafo (TGBM) que son puntos de referencia muy bien marcados, de fácil visualización y empotrados sobre roca. Los TGBM se encuentran vinculados a las redes geodésicas de control vertical y horizontal de la Antártida (REGID/RENID), que es de gran importancia para trabajos geodésicos, oceanográficos e hidrográficos en la zona.

En este trabajo se tomaron datos adicionales de temperatura y salinidad del agua de mar, que se obtuvieron simultáneamente con los registros de marea y que fueron tomados en cuenta para la corrección de los mismos.

Los constituyentes de marea se obtuvieron aplicando el método de análisis armónico por mínimos cuadrados (Foreman 1977). Los registros fueron normalizados a una frecuencia horaria (1 dato/hora) en ambas estaciones. Los resultados obtenidos han mejorado sensiblemente a trabajos previos realizados en la región. Del análisis realizado hemos obtenido setenta constituyentes, observando que la mayor cantidad de energía de la onda de marea (80%) es aportada por ocho componentes, cuatro semi-diurnas (M2, S2, K2,N2) y cuatro componentes diurnas (K1, O1, P1,Q1), sin embargo las diez y nueve (19) componentes más importantes tienen amplitudes superiores al centímetro y aportan un 93% de la energía total de la onda. Los resultados también muestran que en la zona tenemos un régimen de marea mixta con un comportamiento semi-diurno y muy similar en las dos estaciones.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

# Determination of the tide constituents at Livingston and Deception Islands (South Shetland Islands, Antarctica), using annual time series

Bismarck Jigena-Antelo [a,d], Juan Vidal [b,d] & Manuel Berrocoso [c,d]

[a] *Department of Applied Physics, University of Cádiz, Puerto Real, Cádiz, Spain.bismarck.jigena@gm.uca.es*
[b] *Department of Naval Construction, University of Cádiz, Puerto Real, Cádiz, Spain.juan.vidal@uca.es*
[c] *Department of Mathematics, University of Cádiz, Puerto Real, Cádiz, Spain. manuel.berrocoso@uca.es*
[d] *Astronomy, Geodesy an Cartography Laboratory (LAGC-UCA), Faculty of Science, University of Cádiz, Puerto Real, Cádiz, Spain.*

Received: August 26th, 2014. Received in revised form: January 20th, 2015. Accepted: January 26th, 2015

**Abstract**
A detailed study is presented of the tidal constituents for Livingston and Deception Islands (Antarctica) obtained at the LIVMAR and DECMAR tide gauge stations. Data were acquired with tide gauge pressure sensors, and calculated from a long time series of 798 days of data-logging, using the least-squares harmonic estimation method. The results show an improvement over previous results in the region. Seventy tidal constituents were obtained, of which 19 were the most representative with amplitudes greater than 1 cm and a contribution of 93% of the wave energy. In both stations, it was confirmed that the tides are mixed, with a semi-diurnal behavior. The tidal gauge benchmarks (TGBMs) were linked to vertical and horizontal Antarctic Geodetic Networks, which provides a very important contribution for geodetic, oceanographic and hydrographic studies in the area.

Keywords: Antarctica; tidal constituents; harmonic analysis; tidal gauge station; tidal series; tide; Deception Island; Livingston Island; Spanish Antarctic Base.

# Determinación de las constituyentes de marea en las Islas Livingston y Decepción (Islas Shetland del Sur, Antártida), usando series temporales anuales

**Resumen**
Se presenta un estudio detallado de las constituyentes de marea en las islas Livingston y Decepción (Antártida), obtenidas en las estaciones mareográficas LIVMAR y DECMAR. Los datos fueron tomados con mareógrafos de sensores de presión. Los cálculos se realizaron a partir de series de marea de largo período, con 798 días de observación, aplicando el método de análisis armónico por mínimos cuadrados. Los resultados obtenidos mejoran trabajos previos en la región, se han obtenido setenta constituyentes, siendo 19 las más representativas con amplitudes superiores a 1 cm y un aporte del 93% de la energía de la onda. En ambas estaciones se confirma que la marea tiene un régimen mixto de comportamiento semi-diurno. Los benchmark de referencia de mareógrafos (TGBM) se encuentran enlazados a las redes geodésicas de control vertical y horizontal de la Antártida, que es de gran importancia para trabajos geodésicos, oceanográficos e hidrográficos en la zona.

*Palabras clave*: Antártida, constituyentes de marea, análisis armónico, estación de mareas, series de marea, marea, Isla Decepción, Isla Livingston, Base Antártica Española.

## 1. Introducción

Las Islas Shetland del Sur, al ser parte de la Antártida, es una zona geográfica bastante extrema y con un entorno bastante complejo para realizar observaciones oceanográficas y geofísicas en el terreno. Las observaciones de marea en la Antártida son muy escasas y la mayoría corresponden a registros de la temporada del verano austral, debido a las duras condiciones climáticas de la Antártida durante el resto del año, donde normalmente las aguas de las zonas costeras permanecen congeladas hasta el inicio del

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.
DYNA 82 (191), pp. 209-218. June, 2015 Medellín. ISSN 0012-7353 Printed, ISSN 2346-2183 Online
DOI: http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v82n191.45207

verano [10]. Se tienen muy pocos registros con un período de tiempo suficiente que permita obtener los principales constituyentes de marea, en la mayoría de los casos los datos han sido tomados en temporada de verano y no se conocen datos de un año de duración marea [18, 28]. Hasta la fecha, para muchos estudios oceanográficos y geofísicos, se han utilizado datos obtenidos indirectamente, como las cartas co-tidales, cartas de iso-amplitud y datos de altimetría por satélites. Es muy importante obtener una serie de mareas en base a medidas directas, pues nos permite estudiar, con datos reales, la propagación y características de la onda en el entorno de la estación y extrapolarlo a lugares próximos.

Las primeras observaciones de los niveles del mar en la isla Decepción se realizaron en 1970, por personal del Servicio Hidrográfico Argentino (SHA), los datos de marea se obtuvieron durante cuatro días en verano por medio de una regla de marea (mareómetro) instalado cerca de la Base Argentina "Decepción"; podemos ver un histórico de los registros de marea en esta área en [4, 6]. Con estos datos de marea se obtuvo el primer datum vertical referido al vértice geodésico BARG (Base Argentina), perteneciente a la Red Geodésica Isla Decepción (REGID), que fue utilizado como referencia vertical y horizontal durante varios años. Este datum vertical fue trasladado mediante nivelación geométrica de primer orden geodésico hasta el punto LN00, utilizado como referencia vertical de red RENID (Red de Nivelación de Isla Decepción) a partir del año 2003[2, 3, 5, 17].

Diversos autores utilizaron estaciones hidrográficas y correntómetros para estimar la circulación y el transporte en la cuenca oriental del Estrecho de Bransfield [20, 21, 22]. Además de los datos hidrográficos y de corrientes, estos autores instalaron una serie de mareógrafos de fondeo (Registradores de fondeo para niveles de marea, tipo Aanderaa) en la islas Low, Rey Jorge y Livingston, en su estudio, pusieron mucho énfasis en el carácter de las mareas, de las corrientes y la importancia relativa de flujo de las mareas en la hidrodinámica general de circulación en el estrecho. Determinaron que las mareas en el Estrecho de Bransfield tienen una combinación de frecuencias diurnas y semi-diurnas, donde las componentes principales de mareas son O1 (0.0387 cph, ciclos por hora), K1 (0.0418 cph), M2 (0.0805 cph) y S2 (0.0833 cph). Estos autores observaron que las mareas varían de diurna a semi-diurna en período quincenal, con rangos máximos de marea entre 1.7 m y 2.1 m. De estas tres estaciones, la que corresponde a nuestra área de estudio es Isla Livingston (62°30' S, 60°23' W) y tiene un nivel máximo de variación de 1.98 m, donde la componente M2 es la más importante, con una amplitud de 0,39 m y retardo de fase de 277 °. Las componentes K1, 01 y S2 presentan amplitudes similares, de alrededor de 0,28 m.

En base a los estudios de los niveles medios del mar en las islas Low, Rey Jorge y Livingston [14], se demostró que la propagación de la onda M2es perpendicular a la dirección del estrecho de Bransfield, mientras que las ondas diurnas viajan longitudinalmente hacia el sur-oeste a lo largo de la costa, con dirección NE-SW.

Una descripción detallada de la propagación y amplificación de la marea en el lado norte de la Península Antártica (Estrecho de Gerlache, Estrecho de Bransfield y el noroeste del Mar de Weddell) se da en un estudio realizado por [10]. Basado en cartas co-tidales y y cartas de iso-amplitud (co-range), estos autores reportaron las amplitudes y desfases de las principales componentes de marea (M2, S2, O1 y K1) en el Estrecho de Bransfield. Para su estudio utilizaron los resultados del análisis armónico de series de mediciones directas del nivel del mar tomadas de [9, 31]. En el trabajo citado [10], las estaciones se encuentran situadas en Isla de Livingston (Estación Media Luna, HM) y en Isla Decepción, Caleta Péndulo (Estación Péndulo, PC) y Bahía Balleneros (Estación Balleneros, WB). Los niveles de marea se midieron con un mareógrafo de flotador en la Estación de Media Luna (HM) y con un mareómetro o regla de marea (Visual Tide Staff) en las estaciones de Caleta Péndulo (PC) y la Bahía Balleneros (WB). Los períodos de tiempo del registro de los datos de marea fueron muy variables: 38 días en HM, 19 días en PC y 12 días en WB. La Tabla 1 presentan las constantes armónicas de las principales mareas en estas tres estaciones, según [10].

Tabla 1.
Constantes Armónicas de las principales constituyentes de marea, en las estaciones mareográficas HM, PC y WB.

| Estación | HM | | PC | | WB | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Const. | Amp. (m) | Fase (G) | Amp. (m) | Fase (G) | Amp. (m) | Fase (G) |
| M2 | 0.43 | 281 | 0.46 | 280 | 0.44 | 281 |
| S2 | 0.24 | 335 | 0.28 | - | 0.29 | - |
| O1 | 0.28 | 49 | 0.29 | 55 | 0.29 | 48 |
| K1 | 0.28 | 66 | 0.26 | 73 | 0.26 | 66 |

Source: Adapted from Dragani et. al., 2004

Un modelo regional de alta resolución (1/30 ° x 1/60 °) para la región de la Península Antártica y el Mar de Weddell, fue desarrollado por [25] y descrito más recientemente por [39]. A partir de este modelo, es posible estimar las principales componentes de marea para esta zona de estudio. El modelo calcula las principales constituyentes armónicas de marea en las islas y en los pasos estrechos alrededor de la Península Antártica. Los resultados de este estudio se muestran en [25, 30].

También se estudiaron los registros de marea obtenidos en la Base Argentina Jubany (actual Base Carlini), en la isla Rey Jorge [27]. Estos autores presentan el análisis armónico de dos series temporales de registros de mareas correspondientes a los períodos comprendidos entre febrero y diciembre de 1996 y de marzo a diciembre de 1997, con un total de 12 componentes de marea, donde la componente M2 presenta amplitudes de 0.47 - 0.48 m y retardos de fase de 277º a 278°. El factor de forma de la marea (índice de Courtier) es de 0,8 calculado como:

$$F = (K1 + O1) / (M2 + S2) \qquad (1)$$

De acuerdo a este índice obtenido, las mareas se definen como mareas mixtas predominantemente semi-diurna, teniendo todos los días dos pleamares y dos bajamares con desigualdades en altura y tiempo, coincidiendo en lo definido por [8, 27]. La amplitud media de la marea viva, calculada como 2 (M2 + S2), es de 1.48 m.

Posteriormente, el Laboratorio de Astronomía,

Jigena-Antelo et al / DYNA 82 (191), pp. 209-218. June, 2015.

Geodesia y Cartografía de la Universidad de Cádiz (LAGC-UCA) realiza observaciones de marea en las Islas Decepción y Livingston (Antártida) desde diciembre de 2007. En la Campaña Antártica 2007-08 se fondearon dos mareógrafos con sensores de presión, obteniendo registros continuos in situ durante 81 días de observación, se obtienen las primeras series de marea para las estaciones de LIVMAR y DECMAR, entre diciembre de 2007 y marzo de 2008, calculando las primeras constituyentes de marea para las Islas Decepción y Livingston. Se obtienen valores de amplitud y desfase para nueve componentes (M2, S2, N2, K2, O1, P1, K1, Mm, MSf) [36, 37, 17]. Los resultados son similares en amplitud a los obtenidos por [10], pero respecto al desfase hay diferencias a considerar en la componente K1. El coeficiente de forma obtenido fue de 0,86 para DECMAR y 0.80 para LIVMAR, que determina el mismo régimen definido anteriormente por [8, 10]. Con estos registros de marea se calcularon los niveles medios del mar respecto a vértices de la red REGID (Red Geodésica de Isla Decepción) y red RGAE (Red Geodésica Antártica Española) para las estaciones DECMAR, Isla Decepción y LIVMAR, Isla Livingston [37, 17].

En sucesivas campañas se continuaron las observaciones durante el período estival, pero a partir de Febrero de 2011 se han obtenido series temporales continuas con más de dos años de observación (798 días) en ambas islas [17]. En este trabajo presentamos los resultados de nuevas observaciones de marea, correspondientes a dos años completos en las estaciones de DECMAR y LIVMAR, que corresponden a las campañas antárticas españolas 2010-11, 2011-12 y 2012-13 y que constituyen las primeras series mareográficas continuas en la Antártida, cuyos resultados pueden ser válidos para las Islas Shetland del Sur y el Estrecho de Bransfield, tomando como referencia las islas Livingston y Decepción.

## 2. Área de estudio

El área de estudio corresponde a las islas Livingston y Decepción, que forman parte del archipiélago de las islas Shetland del Sur y del Estrecho de Bransfield. El Estrecho de Bransfield es parte del Océano Glacial Antártico, se encuentra delimitado por el Archipiélago de las islas Shetland del Sur, al Norte, y la Península Antártica, al sur. El estrecho es también denominado por los argentinos como Mar de la Flota, tiene unos 500 km. de longitud y unos 120 km de anchura media, es una cuenca marginal activa en donde se ha identificado un eje de extensión con dirección NE-SW entre los paralelos 60º y 63º Sur. Bautizado con ese nombre por James Weddell alrededor de 1825 en homenaje a Edward Bransfield, que cartografió las islas Shetland del Sur en 1820. El estrecho está protegido de mar abierto por las islas Smith, Snow y Livingston por el norte y al oeste, y por la Isla Rey Jorge, al norte y al este [19]. La cuenca está ocupada por seis edificios volcánicos alineados aproximadamente según la dirección principal de la propia cuenca, tiene una actividad volcánica reciente manifestada por los volcanes Bridgeman, Pingüino (Penguin) y Decepción, siendo este último (63º00' S, 60º35' W) el que en la actualidad presenta volcanismo activo y uno de los pocos volcanes activos existentes en la Antártida.

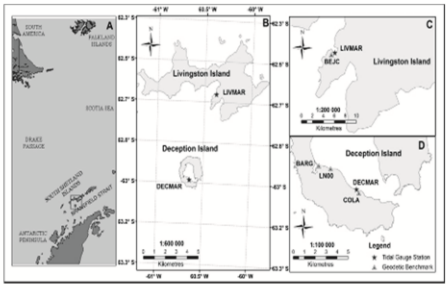



Figura 1. A. Ubicación del área de estudio. B. Ubicación de las estaciones mareográficas en las islas Livingston y Decepción. C. Detalle de Isla Livingston, ubicación de la estación LIVMAR y la BAE "Juan Carlos I". D. Detalle de Isla Decepción, ubicación de la estación DECMAR, BAE "Gabriel de Castila" y Base Antártica Argentina "Decepción" (BARG). Source: LAGC-UCA

En las islas Livingston y Decepción se instalaron dos estaciones mareográficas en puntos cercanos a la costa, denominadas LIVMAR (Caleta Johnsons, Isla Livingston) y DECMAR (Punta Colatinas, Isla Decepción), las estaciones se encuentran próximas a las Bases Antárticas Españolas "Juan Carlos I" y "Gabriel de Castilla", respectivamente.

La Isla Decepción es un volcán activo, tiene forma de herradura y un diámetro de unos 14 kilómetros: La isla tiene una bahía interior llamada Puerto Foster, que fue la caldera central del volcán, que colapsada, fue inundada por el agua de mar y se comunica al estrecho de Bransfield a través de un paso angosto y poco profundo denominado Fuelles de Neptuno[29]; la estación DECMAR se encuentra ubicada en Punta Colatinas a unos 3 km al sur de la BAE Gabriel de Castilla y cerca de los Fuelles de Neptuno (unos 3 km).

Livingston es la segunda isla en tamaño del archipiélago de las Shetland del Sur, tiene unos 70 km de largo y ancho variable entre los 4 y los 32 kilómetros, la estación LIVMAR se encuentra instalada en Caleta Johnsons, es una pequeña cala semi-cerrada, poco profunda, situada en el sur de la isla Livingston, cerca de la Base Antártica Española "Juan Carlos I", la Fig. 1 muestra la ubicación de las estaciones mareográficas en el área de estudio.

## 3. Instrumentación, datos y metodología.

### *3.1. Equipos utilizados para toma de datos de marea*

Los datos fueron obtenidos mediante dos sensores de presión, se utilizaron como referencia sensores de presión SAIV modelo TD304, con sensores adicionales de temperatura y conductividad que tienen una precisión de ± 0,01% del fondo de escala en la medida de la presión por cada 10 m, es decir, una precisión de 1 mm. Los datos de presión, temperatura y conductividad se registraron en las estaciones por medio de un sensor CTD 204 SAIV SD que tiene una precisión de ± 0,02 ppt en salinidad (para conductividad) y ± 0,01 º C para la temperatura; además, se utilizaron sensores

Jigena-Antelo et al / DYNA 82 (191), pp. 209-218. June, 2015.

AQUAlogger PT520 de temperatura y de presión que tienen una precisión de ± 0,05 ° C en temperatura y de 0,005% a escala completa para cada 10 m, en presión. Con estos datos, se obtuvieron mediciones instantáneas del nivel del mar.

### *3.2. Fondeo de sensores de presión*

El problema principal de instalación de estaciones mareográficas en la Antártida, son las extremas condiciones climatológicas, que tienen como consecuencia el congelamiento de la capa superficial del agua de mar durante el invierno, formando banquisa y placas de hielo que al moverse pueden desplazar el sensor y romper los cables y cabos que los aseguran a la costa y con ello perder el equipo y los datos. Por esta razón, hemos diseñado un sistema bastante seguro, que protege tanto a los sensores de presión, asegurados en los lastres de fondeo y colocados en el interior de un tubo de hierro galvanizado, abierto en uno de sus costados; como a todo el sistema de fondeo, pues el lastre de fondeo fue asegurado a las rocas de la orilla, mediante anclajes con cables y cabos de gran resistencia a la tracción, para evitar que se rompan y que el sensor pueda perderse en el fondo (Fig. 2, 3) y de esta manera minimizar los riesgos de desplazamiento, obtener mediciones directas de los niveles de marea con la mayor seguridad y precisión posible y evitar los saltos en la serie temporal provocados por estos desplazamientos.

Los sensores de presión fueron fondeados a unas profundidades aproximadas de 7.5 m y 3.5 m en LIVMAR y DECMAR respectivamente, y en ambos casos cercanos a la costa, a unos 30 metros de la línea de playa, con la finalidad de minimizar los errores en la posterior referencia al respectivo benchmark de referencia de mareógrafo (TGBM, Tide Gauge Benchmark), ubicado en tierra.

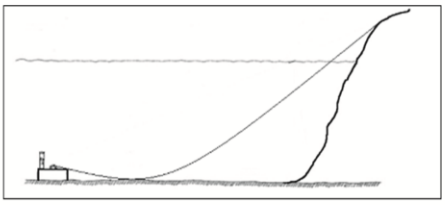


Figura 2. Sistema de fondeo y anclaje del mareógrafo la costa
Source: LAGC-UCA

Figura 3. Fondeo del sensor de presión principal (PTG) en la estación mareográfica DECMAR
Source: LAGC-UCA

Para el fondeo de los mareógrafos se utilizó como plataforma de trabajo una embarcación neumática Zodiac Pro 500, quedando los fondeos ubicados a unos 30 metros de la línea de playa y entre los 3 y los 9 metros de profundidad, dependiendo de la configuración del fondo en los sitios de fondeo. La Fig. 6 muestra la maniobra de fondeo de los mareógrafos.

### *3.3. Georreferenciación de estaciones*

Para el control vertical, los datos de marea fueron referidos altimétricamente a un TGBM, que a su vez está enlazado con otras marcas auxiliares de referencia de nivel (TGAR, Tide Gauge Auxiliary Reference). Los valores locales de profundidad promedio en cada una de las estaciones fueron de 3.147 m. en la isla Decepción y 7.475 m. en Livingston. Para obtener los valores medios de profundidad de fondeo de los sensores, las medidas del nivel del mar obtenidas con el sensor principal (PTG) se vincularon altimétricamente al TGBM fijo en tierra, mediante un método indirecto, instalando cercano a la zona donde se encuentra fondeado el PTG, otro sensor de presión colocado en una regla de nivelación (TSG, Tide Staff Gauge), del cual se conoce su cero o nivel de referencia vertical y cuya parte superior sobresale del agua para poder realizar las lecturas mediante un nivel óptico; tomando las lecturas simultáneas a las dos reglas de nivelación, TSG y TGBM, mediante nivelación geométrica, obtenemos el desnivel del TSG con respecto al TGBM, y por lo tanto las alturas de marea son referidas al TGBM, que luego son comparadas con las lecturas de marea obtenidas por el PTG, del cual hemos obtenido su profundidad mediante un ajuste lineal y por lo tanto, todas las lecturas de marea quedan referidas al TGBM [33, 34]. Por este método, lo que se hace es comparar las lecturas simultáneas del nivel de marea obtenida con el sensor principal PTG, contra sensor de control móvil instalado en la regla de nivelación TSG, que ha sido referenciado mediante nivelación geométrica al TGBM, que se encuentra en tierra. Este procedimiento de referenciación altimétrica fue realizado en ambas estaciones (LIVMAR y DECMAR). Por el método de nivelación geométrica, también se realizaron los enlaces entre el TGBM y sus respectivas marcas auxiliares de referencia (TGAR), para más detalles ver Fig. 4-6.

Los TGBM y TGAR fueron monumentados mediante un clavo, situados sobre una roca de fácil visualización que se encuentre por encima del nivel de la pleamar y muy próximos al sitio de fondeo de los mareógrafo [35, 17]. Cada TGBM se encuentra vinculado al menos a dos marcas auxiliares TGAR, que es la marca vertical auxiliar de seguridad para la recuperación de la referencia principal TGBM, en caso de una posible destrucción o pérdida. Toda la vinculación altimétrica se ha realizado mediante nivelación geométrica de primer orden geodésico con la ayuda de nivel óptico Wild (Leica) modelo NA2, cuya precisión es de 0.7 mm por cada kilómetro de doble nivelación. Los TGBM son posteriormente vinculados a puntos de las redes geodésicas de la Antártida, tanto en vertical como en horizontal [37, 17].

Jigena-Antelo et al / DYNA 82 (191), pp. 209-218. June, 2015.

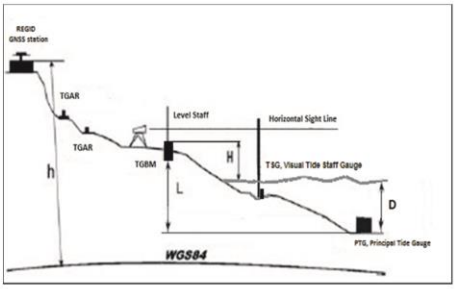



Figura 4. Diagrama de enlaces de nivelación en las estaciones mareográficas, entre los benchmarks de referencia de mareógrafos (TGBM), las marcas auxiliares de referencia (TGAR) y los sensores utilizados en la toma de datos.
Source: Adapted from Vidal et. al., 2012.

Para obtener la profundidad de fondeo respecto al TGBM en las estaciones de LIVMAR y DECMAR, se realizó un ajuste lineal entre las alturas instantáneas del nivel del mar medidas por el sensor principal PTG, definida como D, contra las alturas medidas con el sensor de control TSG, definida como H, tomadas simultáneamente y temporalmente sincronizadas. Las mediciones de control, entre PTG y TSG se realizaron en días escogidos, días sin viento y sin olas (mar en calma) tomando las lecturas simultáneas durante 1 hora con una frecuencia (data sampling) de 10 minutos. Para la estación DECMAR, se realizaron medidas durante 7 días obteniéndose 36 medidas distribuidas durante todo el período de registro de la serie. El mismo procedimiento se siguió para LIVMAR, con controles durante dos días con un total de 13 medidas que se realizaron al inicio y al final del período de registro de marea (dos días).

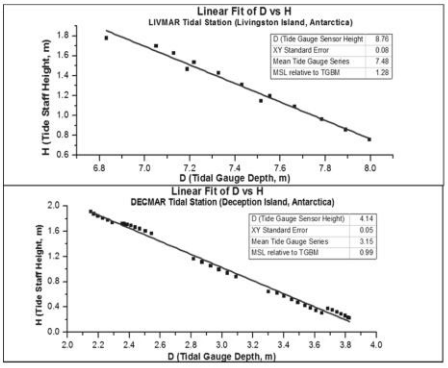



Figura 5. Ajuste lineal entre las medidas instantáneas del nivel medio del mar en LIVMAR y DECMAR.
Source: LAGC-UCA

Figura 6. Referenciación altimétrica de las medidas de marea
Source: LAGC-UCA

El ajuste lineal entre la presión del sensor principal PTG, transformada en profundidad y corregida por presión atmosférica (D), contra los datos de altura (H), tomados por el sensor de control TSG, instalado en la regla de marea y corregidos por lectura de nivelación tomada al TGBM, nos proporciona un valor medio del nivel de marea para cada instante de la lectura, y en base a los cuales se corrigen altimétricamente los datos de la serie. La Fig. 5 nos muestra los resultados del ajuste lineal realizado por este método en las estaciones de DECMAR y LIVMAR.

Este método de control altimétrico de los registros de marea es muy difícil de aplicar de forma continua, debido a que solo puede ser instalado y utilizado durante la época estival; debido, al uso de personal técnico para su ejecución; además, el mareógrafo de control TSG se debe quitar durante el invierno para evitar daños o su destrucción por la banquisa o las placas de hielo marino. La Fig. 6 nos muestra la instalación y utilización de las reglas de control.

El período de registro de marea, tanto en LIVMAR como en DECMAR, está comprendido entre el 3 de febrero de 2011 y el 11 de Abril de 2013. El intervalo de muestreo de los datos fue de 10, 20 y 60 minutos, aunque para el cálculo y análisis armónico todas las series fueron normalizadas a 60 minutos (1 dato/hora), obteniendo las series temporales respectivas en cada estación, que fueron sometidas a un análisis armónico utilizando una aplicación en Matlab desarrollada de acuerdo a [12]. Hay que recalcar que esta es la primera vez que se tienen series de marea en la Antártida con más de un año de registro, hasta la fecha los registros de marea se limitaban a

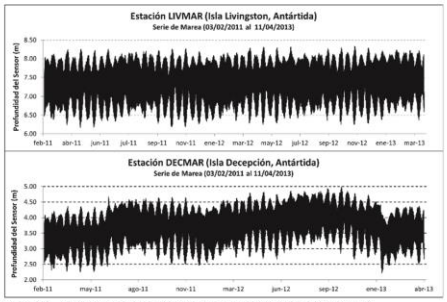



Figura 7. Series de marea obtenidas en LIVMAR y DECMAR
Source. LAGC-UCA

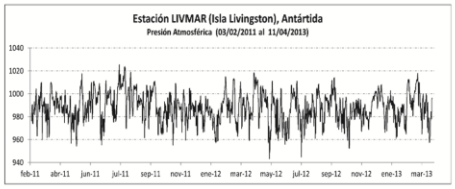



Figura 8. Serie de presión atmosférica en LIVMAR
Source: LAGC-UCA

la temporada de verano debido a las extremas condiciones climatológicas durante el resto del año.

Durante todo el período del registro de datos de marea, también se obtuvieron datos meteorológicos de presión atmosférica y temperatura del aire, tomados por la Agencia Española de Meteorología (AEMET), registrados en las estaciones de Gabriel de Castilla (Isla Decepción) y Juan Carlos I (Isla Livingston). La presión atmosférica en la estación de Isla Livingston osciló entre un mínimo de 943,35 mb el 22 de mayo de 2012 y un máximo de 1025, 59 mb el 09 de abril de 2013 y un promedio de 988,27 mb. Para la presión atmosférica, se tomó como serie de referencia, la serie obtenida en Livingston, al ser una serie muy completa y estable, puesto que el registro de la estación Gabriel de Castilla tenía muchos datos faltantes. La Fig. 7, presenta la serie de presión atmosférica obtenida en la estación LIVMAR.

Para convertir la presión hidrostática a una altura equivalente del nivel del mar, usamos:

$$h = (P-Pa) / \rho g \qquad (2)$$

donde, P es la presión registrada por el sensor del mareógrafo, Pa es la presión atmosférica de referencia (un valor constante, 990.8 mb), g es la aceleración debida a la gravedad cuyo valor medio en Isla Decepción es 9,822956 m/s2 y $\rho$ la densidad del agua en el área de estudio, cuyo valor medio es de 1025 kg/m3, calculado utilizando los registros de temperaturas y salinidades para un valor medio de la zona [33, 11]. Al valor obtenido se denomina nivel del mar ajustado (NMA). El sensor de presión mide la presión total, por lo tanto, no muestra los efectos estáticos de variaciones de la presión atmosférica. Una variación de la presión atmosférica de referencia es equivalente a mover el nivel de referencia del sensor [24, 1].

Para el presente trabajo se tomaron registros de presión atmosférica, simultáneos a las medidas de marea, obteniendo unos valores medios de 988,39 mb en Decepción y 987,27 mb en Livingston, siendo el valor medio para la zona de 988.27 mb, que no difiere significativamente del valor utilizado en [37, 17], que utiliza como presión atmosférica de referencia, un valor constante de 990.8 mb (hPa) que corresponde a la presión atmosférica media en la región de la Isla Rey Jorge y el entorno cercano de la estación Arctowski durante el período 1978-1989 [26]. De esta manera, el nivel del mar efectivo, lo podemos obtener para cualquier tiempo en particular y puede ser corregida mediante la adición o sustracción de los cambios causados en la presión atmosférica respecto a los valores de referencia; a frecuencia lo suficientemente baja la corrección es de aproximadamente al descenso de un centímetro (-1.0 cm) en el nivel de la superficie del mar, por cada milibar de aumento (+1 mb) en la presión atmosférica [7,15, 24, 40].

Se ha realizado el análisis armónico por mínimos cuadrados a los registros de marea, acorde con [12, 13, 16]. Las series de marea analizadas tienen un total de 19143 datos horarios, lo que supone un registro de más de dos años (798 días) para ambas estaciones. Sin embargo, los registros corresponden a varias series tomadas para la misma estación, siendo seis series para DECMAR y tres series para LIVMAR, que fueron unidas en una sola y corregidas por saltos, principalmente por las diferentes profundidades a las que se instalaron los sensores en cada campaña. Para corregir los saltos provocados durante el cambio de equipos en un nuevo fondeo, se ajustan las dos series aplicando el algoritmo de corrección del escalonamiento por elevación de la serie. También se utilizó como sensor de referencia un sensor de presión adicional fondeado en las proximidades, cuyos registros se solapan con los de las series anterior y posterior al cambio de equipo.

Una vez corregidos los saltos, hemos reconstruido las series completas de marea en ambas estaciones. A las alturas de marea corregidas aplicamos el análisis armónico para evaluar las amplitudes y el desfase de las componentes. Las amplitudes de marea y el desfase han sido calculadas para la hora UTC correspondiente a huso horario de la estación, aplicando la corrección nodal, con un intervalo de muestreo de una hora y para un intervalo de confianza del 95%.

## 4. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en amplitud de los principales componentes de marea en ambas estaciones se muestran en la Fig. 9, se han realizado cuatro análisis para cada estación, tres de ellos para series de un año y el cuarto para la serie

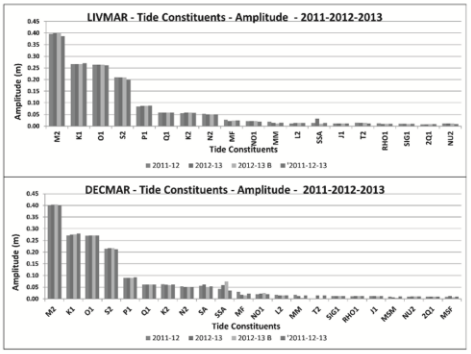



Figura 9. Amplitud de las principales constituyentes de marea en LIVMAR y DECMAR.
Source: LAGC-UCA

Jigena-Antelo et al / DYNA 82 (191), pp. 209-218. June, 2015.

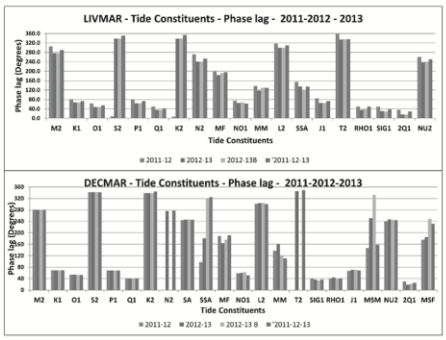



Figura 10. Desfase de las principales constituyentes de marea en LIVMAR y DECMAR.
Source: LAGC-UCA

completa. En todos ellos podemos observar bastante uniformidad en los resultados obtenidos que nos dan una buena idea de la validez de los mismos. En cuanto al desfase los resultados también son similares.

En cuanto al desfase los resultados son similares en las principales constituyentes y se muestran en Fig. 10.

En la Tablas 2A y 2B, se muestran los resultados del análisis realizado a la serie completa, habiendo obtenido para ambas estaciones una condición de matriz de 0.82 y un ajuste de 0.993.

Tabla 2A.
Estación LIVMAR. Principales constituyentes de marea

| Estación LIVMAR | | | |
|---|---|---|---|
| Constante | Frecuencia | Amplitud (m) | Desfase (grados) |
| M2 | 0.08051 | 0.39 | 290.1 |
| K1 | 0.04178 | 0.27 | 73.5 |
| O1 | 0.03873 | 0.26 | 54.9 |
| S2 | 0.08333 | 0.20 | 351.2 |
| P1 | 0.04155 | 0.09 | 73.1 |
| Q1 | 0.03722 | 0.06 | 41.8 |
| K2 | 0.08356 | 0.06 | 354.6 |
| N2 | 0.07900 | 0.05 | 253.8 |
| MF | 0.00305 | 0.02 | 195.5 |
| NO1 | 0.04027 | 0.02 | 62.3 |
| MM | 0.00151 | 0.02 | 128.5 |
| L2 | 0.08202 | 0.01 | 308.9 |
| SSA | 0.00023 | 0.01 | 133.7 |
| J1 | 0.04329 | 0.01 | 71.9 |
| T2 | 0.08322 | 0.01 | 335.4 |
| RHO1 | 0.03742 | 0.01 | 49.4 |
| SIG1 | 0.03591 | 0.01 | 37.9 |
| 2Q1 | 0.03571 | 0.01 | 29.2 |
| NU2 | 0.07920 | 0.01 | 250.6 |
| Longitud serie (días) | | 797.63 | |
| Datos Observados | | 19143 | |
| Condición de Matriz | | 0.82 | |
| Ajuste | | 0.993 | |
| Courtier | | 0.91 | |

Source: LAGC-UCA

Tabla 2B.
Estación DECMAR. Principales constituyentes de marea

| Estación DECMAR | | | |
|---|---|---|---|
| Constante | Frecuencia | Amplitud (m) | Desfase (grados) |
| M2 | 0.08051 | 0.40 | 280.5 |
| K1 | 0.04178 | 0.28 | 68.9 |
| O1 | 0.03873 | 0.27 | 52.5 |
| S2 | 0.08333 | 0.21 | 341.2 |
| P1 | 0.04155 | 0.09 | 68.5 |
| K2 | 0.08356 | 0.06 | 338.5 |
| Q1 | 0.03722 | 0.06 | 40.3 |
| N2 | 0.07900 | 0.05 | 245.1 |
| SSA | 0.00023 | 0.04 | 324.9 |
| MF | 0.00305 | 0.02 | 190.4 |
| NO1 | 0.04027 | 0.02 | 51.7 |
| L2 | 0.08202 | 0.01 | 300.2 |
| MM | 0.00151 | 0.01 | 110.3 |
| T2 | 0.08322 | 0.01 | 348.6 |
| SIG1 | 0.03591 | 0.01 | 37.0 |
| RHO1 | 0.03742 | 0.01 | 39.6 |
| J1 | 0.04329 | 0.01 | 68.5 |
| NU2 | 0.07920 | 0.01 | 243.6 |
| 2Q1 | 0.03571 | 0.01 | 25.0 |
| Longitud serie (días) | | 797.63 | |
| Datos Observados | | 19143 | |
| Condición de Matriz | | 0.82 | |
| Ajuste | | 0.993 | |
| Courtier | | 0.90 | |

Source: LAGC-UCA

En la Tablas 2A y 2B presentamos los diecinueve constituyentes de marea más importantes, cuya amplitud es superior a un centímetro (M2, K1, O1, S2, P1, Q1, K2, N2, NO1, MF, MM, L2, SSA, J1, T2, RHO1, SIG1, 2Q1, NU2) y cuyo aporte de energía es del 93% del total de la onda para ambas estaciones.

En todos los análisis armónicos realizados, se muestra que la mayor cantidad de energía de la onda de marea (85%) es aportada por ocho componentes, cuatro semi-diurnas (M2, S2, K2, N2) y cuatro componentes diurnas (K1, O1, P1, Q1), con un aporte similar para cada grupo de más o menos un 42,5%.

En lo referente a las amplitudes de las series, los resultados nos muestran que las amplitudes, máxima y mínima, son de 4.986 m. y 2.224 m con un rango de 2.762 m para DECMAR, y de 8.334 m y 6.169 m con un rango de 2.165 m para LIVMAR.

El factor de forma de marea o índice de Courtier obtenido es 0,91 y 0.90 para LIVMAR y DECMAR respectivamente, ha sido calculado de acuerdo a (1) y nos determina que en el área de estudio las mareas tienen un régimen mixto, con una componente predominantemente semi-diurna ($0.25 < C < 1.50$), teniendo todos los días dos pleamares y dos bajamares, como habían definido [8, 10].

En general, los resultados en amplitud, desfase y régimen de marea, no difieren significativamente, los resultados obtenidos por [30, 28, 20, 14, 27, 22, 31, 25, 9, 10, 37, 17], sin embargo, se observan variaciones significativas en la constituyente K1 con respecto a los valores dados por [10, 37]. La Fig. 11 nos muestra el registro de mareas durante un mes y en ella se aprecia el régimen mixto y semi-diurno de las mismas.

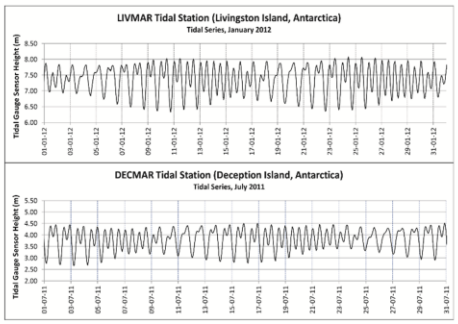



Figura 11. Serie de marea en LIVMAR (Enero/2012) y DECMAR (julio/2011).

Al contar con una serie de más de dos años de observaciones con el análisis armónico hemos obtenido setenta constituyentes de marea, entre las cuales tenemos constituyentes de frecuencia quincenal, mensual, semi-anual y anual.

El resultado del ajuste entre los datos reales y los datos predichos es de un 99.3%, que es un parámetro excelente y muy representativo para realizar predicciones en base a los datos obtenidos y utilizados en el análisis.

## 5. Conclusiones

La Antártica es una región donde los datos de mareas son escasos; por este motivo, las series temporales de más de un año, son datos muy valiosos para estudios de la marea en la zona.

En este trabajo presentamos un estudio de los registros de mareas en Decepción y Livingston correspondientes a 798 días de observación continua, lo que ha permitido obtener las constituyentes de marea de corto periodo (diurno y semi-diurno) y de largo período (quincenal, mensual, semi-anual y anual). Estas series de marea corresponden a los datos obtenidos en las estaciones de LIVMAR y DECMAR, en las campañas antárticas 2010-11, 2011-12, 2012-13, en la que además se han tomado datos simultáneos de presión atmosférica para las mismas estaciones.

Para la obtención de las amplitudes y los retardos de fase de los diferentes constituyentes, hemos utilizados el análisis armónico por mínimos cuadrados, habiendo obtenido 70 armónicos, siendo 19 constituyentes los más representativos, cuya amplitud es superior a 1 cm y que aportan un 93% de la energía de la onda de marea. Los resultados obtenidos nos muestran que la marea en ambas estaciones tiene un régimen de marea mixta con un comportamiento semi-diurno.

Una conclusión importante es la falta de registros de marea referenciados altimétricamente a puntos de referencia vertical permanentes, que sean utilizados a partir de la fecha como benchmarks de referencia de mareógrafos (TGBM). Uno de los objetivos fue dejar monumentados los (TGBM, Tide Gauge Benchmark) y las marcas auxiliares de referencia de nivel (TGAR, Tide Gauge Auxiliary Reference), que quedaran como datums fundamentales para referencia vertical y horizontal de las estaciones mareográficas de LIVMAR y DECMAR, y que utilizaremos posteriormente para la determinación del nivel medio del mar en la zona.

El nivel medio del mar (NMM) es el plano de referencia vertical fundamental, de obligada utilización en aplicaciones geodésicas, geofísicas y oceanográficas tanto técnicas como científicas. Este trabajo es uno de los primeros de una serie de estudios de marea utilizando series de datos a largo período y que en el futuro podrá ser vinculado para la referenciación altimétrica de la Red Geodésica de Isla Decepción (REGID) y la Red Geodésica de la Antártida Española (RGAE).

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible a la financiación de los siguientes proyectos, dependientes del Ministerio Español de Ciencia e Innovación, a través del programa de Investigación Antártica y recursos naturales:

- SEGAVDEC-GEODESIA (CGL2007-28768-E/ANT), "Seguimiento de la actividad volcánica de la Isla Decepción (Antártida)"
- SERTEMANT-GEODESIA (CTM2008-03113-E/ANT), "Continuidad y análisis de series temporales geodésicas en la Antártida"
- GEOTINANT (CTM2009-07251/ANT), "Investigaciones geodésicas y geotérmicas, análisis de series temporales e innovación volcánica en la Antártida (Islas Shetland del Sur y Península Antártica)"

Los autores agradecen a la tripulación del Buque de Investigación Oceanográfica "BIO Las Palmas" y al personal de las Bases Antárticas Españolas "Gabriel de Castilla" y "Juan Carlos I", por su apoyo en los trabajos de campo para instalación de equipos y toma de datos, en las diferentes campañas.

Nuestro agradecimiento a los profesores Oscar Álvarez de la Universidad de Cádiz, por sus comentarios y proporcionar el software UCAD2D y Francisco García de la Universidad del Magdalena (Colombia) por proporcionar el software T-Tide, que nos han servido para comparar y validar nuestros resultados. Al Dr. Andrés Jiménez, de la Universidad de Cádiz, por su ayuda y sugerencias en el tratamiento de las series temporales.

## Referencias

[1] Álvarez, O., Tejedor B., Tejedor L. and Kagan B.A., A note on sea-reeze-induced seasonal variability in the K1 tidal constants in Cádiz Bay, Spain. Estuarine Coastal and Shelf Science 58, pp. 805-812, Elsevier Ltd., 2003. DOI:10.1016/S0272-7714(03)00186-0

[2] Berrocoso M., Jiménez Teja Y. and Páez R., Determination of a physical reference frame for Deception Island. Geophysical Research Abstracts. 2006.

[3] Berrocoso, M., Ramírez, M.E., Fernández-Ros, A., Torrecillas, C., Enríquez-Salamanca, J.M., Pérez-Peña, A., Páez, R., Jiménez-Teja, Y., González-Fuentes, M.J., Sánchez-Alzola, A., García-García, A., Tárraga, M. y García-García, F., Diseño, desarrollo, objetivos y estado actual de las redes geodésicas establecidas en la Antártida durante las campañas antárticas españolas. VII Simposio de Estudios Polares, Granada, Spain. 2006.[en línea] Disponible en: https://www.uam.es/otros/cn-scar/pdf/simposio_polar.pdf

[4] Berrocoso, M., Fernández-Ros, A., Torrecillas, C., Enriquez-Salamanca, J.M., Ramírez, M.E., Pérez-Peña, A., González-Fuentes, M.J., Páez, R., Jiménez-Teja, Y., García-García, A., Tárraga M. and García-García, F., Geodetic research on Deception Island, Antarctica. In Fütterer, D.K., Damaske, D., Kleinschmidt, G., Miller, H. and Tessensohn, F., Eds. Antarctica: Contributions to Global Earth Sciences. Berlín. Springer, [Online]. pp. 391-396, 2006. Available at: https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCEQFjAA&url=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Fcontent%2Fpdf%2F10.1007%252F3-540-32934-X_49.pdf&ei=D1_BVIfTJ-GsygOA4YLIDA&usg=AFQjCNE73DDTG42zTVL8DhzZKZdw7cV8hQ&sig2=6dYA9SgSkQ5FwtcRrcgt7A

[5] Berrocoso, M., Salamanca, J.M., Ramírez, M.E., Fernández-Ros, A. and Jigena, B., Determination of a local geoid for Deception Island, in Antarctica: A keystone in a Changing World, [Online]. Proceedings of the 10th ISAES X, edited by A. K. Cooper and C.R. Raymond et al.., USGS Open-File Report 2007-2007-1047, Extended Abstract 123, 5 P., Poster Sesion 145, 10.3133/of2007-1047.141 p. 2007. Available at: http://pubs.usgs.gov/of/2007/1047/ea/of2007-1047ea123.pdf

[6] Berrocoso, M., Fernández-Ros, A., Ramírez, M.E., Enriquez-Salamanca, J.M., Torrecillas, C., Pérez-Peña, A., Páez, R., García-García, A., Jiménez-Teja, Y., García-García, F., Soto, R., Gárate, J., Martín-Dávila, J., Sánchez-Alzola, A., de Gil, A., Fernández-Prada, J.A. and Jigena, B. Geodetic research on Deception Island and its Environment (South Shetland Islands, Bransfield Sea and Antarctic Peninsula) during Spanish Antarctic Campaigns (1987–2007). In: Capra, A. & Dietrich, R., Eds. Geodetic and Geophysical Observations in Antarctica. Springer-Verlag, Berlin, [Online]. pp 97-124. 2008. Available at: file:///C:/Users/Bismarck/Dropbox/PROY%20NMM-DEC/Articulos%20Cientificos/0%20Dyna/Articulos%20Referencia/Book%20Capra%20%253A978-3-540-74882-3.pdf

[7] Chelton, D.B. and Enfield., Ocean signals in tide gauge records. Journal of Geophysical Research, [Online]. 91, pp. 9081-9098. 1986. Available at: http://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/bitstream/handle/1957/16001/Chelton_and_Enfield_JGR_1986.pdf?sequence=1

[8] Defant, A., Physical oceanography, 2. New York: Pergamon Press, 598 P, 1961.

[9] D'onofrio, E.E., Dragani, W.C., Speroni, J.O. and Fiore, M.E., Propagation and amplification of tide at the north-eastern coast of the Antarctic Peninsula. An observational study. Polar Geoscience, 16, pp. 53-60. 2003.

[10] Dragani, W.C., Drabble, M.R., D'onofrio, E.E. and Mazio, C.A., Propagation and amplification of tide at Bransfield and Gerlache straits, northwestern Antarctic Peninsula. An observational study. Polar Geosciences, 17, pp. 156-170, 2004.

[11] Fofonoff, N.P. and Millard, Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. UNESCO Technical Papers in Marine Science, [Online]. 44, 53 P. 1983. Available at: http://unesdoc.unesco.org/images/0005/000598/059832eb.pdf

[12] Foreman, M.G.G., Manual for tidal heights analysis and prediction. Sidney, BC: Institute of Ocean Sciences, Pacific Marine Science Report 77-10, [Online]. 97 P. 1977. Available at: ftp://canuck.seos.uvic.ca/docs/MFTides/heights.pdf

[13] García, F., Palacio, C. and García, U., Tide constituents at Santa Marta Bay (Colombia). DYNA, [Online]. 78 (167), pp. 142-150, 2011. Available at:http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25777/26199

[14] García, M.A., Oceanografía dinámica de un mar Antártico: El Estrecho de Bransfield. Investigación Española en la Antártida, Seminario de la Universidad Internacional Menéndez Pelayo. Santander, 19–23 Julio, 1993. Madrid: Centro de Publicaciones, Ministerio de Educación y Ciencia, pp. 193-208. 1994.

[15] Gill, A.E., Atmosphere-Ocean Dynamics, In: International Geophysics, 30. [Online]. Editor Academic Press, 1982. 662 P., San Diego, California. 1982. Available at: http://books.google.fr/books?id=1WLNX_lfRp8C&printsec=frontcover&hl=fr&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

[16] Godin, G., The analysis of tides. Toronto: University of Toronto Press, 264 P. 1972.

[17] Jigena, B., Vidal, J. and Berrocoso, M., Determination of the mean sea level at Deception and Livingston Islands, Antarctica. Antarctic Science [Online]. 27 (01) pp. 101-102. 2015. DOI: DOI:10.1017/S0954102014000595

[18] King, M.A. and Padman, L., Accuracy assessment of ocean tide models around Antarctica.Geophysical Research Letters, 32, L23608, DOI:10.1029/2005GL023901. 2005.

[19] Lenn, Y.D., Chereskin, T.K. and Glatts, R.C., Seasonal to tidal variability in currents, stratification and acoustic backscatter in an Antarctic ecosystem at Deception Island. Deep-Sea Research II (50), pp. 1665-1683. 2003. DOI:10.1016/S0967-0645(03)00085-7

[20] López, O., García, M.A. y Sánchez-Arcilla, A.S., Marea y circulación en el Estrecho de Bransfield durante el verano austral 92/93. In Cacho, J. and Serrat, D. (Eds). Actas del V Simposio Español de Estudios Antárticos. Madrid. Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología, pp. 389-401, 1993.

[21] López, O., García, M.A. and Sánchez-Arcilla, A.S., Tidal and residual currents in the Bransfield Strait, Antarctica. Annales Geophysicae, [Online]. 12, pp. 887-902- 1994. Available at: http://link.springer.com/article/10.1007/s00585-994-0887-5

[22] López, O., García, M.A., Gomis, D., Rojas, P., Sospedra, J. and Sánchez-Arcilla, A.S., Hydrographic and hydrodynamic characteristics of the eastern basin of the Bransfield Strait (Antartica). Deep-Sea Research I, 46, pp. 1755-1778. 1999. DOI:10.1016/S0967-0637(99)00017-5

[23] Meredith, M.P., Brandon, A., Wallace, M.I., Clarke, A., Leng, M.J., Renfrew, M.A., van Lipzig, N.P.M. and King, J.C., Variability in the freshwater balance of northern Margarite Bay, Antarctic Peninsula: results from $\delta^{18}$ O. Deep-Sea Research II, 55, pp. 309-322. 2008. DOI: 10.1016/j.dsr2.2007.11.005

[24] Muñoz-Pérez, J.J. and Abarca-Molina, J.M., Effect of wind and atmospheric pressure variations on the mean sea level of salt marshes and estuaries. Revista de Obras Públicas, [Online]. 156 (3505), ISSN 0034-8619. 2009. Available at: http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/2009/2009_diciembre_3505_02.pdf

[25] Padman, L., Fricker, H.A., Coleman, R., Howard, S. and Erofeeva, L., A new tide model for the Antarctic ice shelves and seas. Annals of Glaciology, 34, pp. 247-254. 2002. DOI: 10.3189/172756402781817752

[26] Rakusa-Suszczewski, S., Mietus, M. and Piasecki, J., Pogoda i klimat In Rakusa-Suszczewwski S., Eds. Zatoka Admiralicji Antarktyki. Dziekanów Les'ny. Poland. Institut Ekologii PAN, pp. 41-50. 1992.

[27] Schöne, T., Pohl, M., Zakrajsek, A.F. and Schenke, H.W., Tide gauge measurements, a contribution for the long-term monitoring of the sea level. In: Wiencke, Ferreyra, Arntz, Rinaldi (Eds.): The Potter Cove coastal ecosystem, Antarctica, Berichte zur Polarforschung, [Online]. 299, pp. 12-14, 1998. Available at: http://epic.awi.de/4288/

[28] SCAR (Scientific Committee for Antarctic Research), Antarctic digital database on CD-ROM. Cambridge: SCAR. 1993.

[29] Smith, Jr. K.L., Baldwin, R.J., Glatts, R.C., Chereskin, T.K., Ruhl, H. and Lagun, V, Weather, ice, and snow conditions at Deception Island, Antarctica: Long time-series photographic monitoring. Deep-Sea Research II, 50, pp. 1649-1664, 2003. DOI:10.1016/S0967-0645(03)00084-5

[30] Smithson, M.J., Pelagic tidal constants 3, IAPSO Publication Scientifique 35. Birkenhead: IAPSO, IUGG, 191 P, 1992.

[31] Speroni, J.O., Dragani ,W., D'Onofrio, E.E., Drabbl,e M.R. y Mazio, C.A., Estudio de la marea en el borde de la Barrera Larsen, Mar de Weddell Noroccidental, Antártida. GeoActa, 25, pp. 1-11, 2000.

[32] Thompson, R.O.R.Y., Low pass filter to suppress inertial and tidal frequencies. Journal of Physical Oceanography, 13, pp. 1077-1083. 1983. DOI:10.1175/1520-0485(1983)013<1077:LPFTSI>2.0.CO;2

[33] UNESCO, Tenth report of the joint panel on oceanographic tables and standards. Technical Papers in Marine Science, [Online]. 36, 25 P. 1981. Available at: http://unesdoc.unesco.org/images/0004/000461/046148eb.pdf

[34] UNESCO, Intergovernmental Oceanographic Commission workshop on sea level measurements in hostile conditions, 28–31 March 1988, Bidston, UK. IOC Workshop Report, [Online]. 54, 81 P. 1988. Available at: http://www.jodc.go.jp/info/ioc_doc/Workshop/081610eo.pdf

[35] UNESCO, Intergovernmental Oceanographic Commission manual on sea level measurement and interpretation. II. Emerging technologies. UNESCO Manuals and Guides, [Online]. 14, 77 P. 1994. Available at: http://www.psmsl.org/train_and_info/training/manuals/ioc_14ii.pdf

[36] Vidal, M., Berrocoso, M. and Jigena, B., Hydrodynamic modeling of port foster, Deception Island (Antarctica). In: Nonlinear and Complex Dynamics: Applications in Physical, Biological, and Financial Systems. [Online]. pp 193-203, 2011. Available at: http://springer.libdl.ir/chapter/10.1007/978-1-4614-0231-2_16

[37] Vidal, J., Berrocoso, M. and Fernández-Ros, A. Study of tides and sea levels at Deception and Livingston islands, Antarctica. Antarctic Science 24 (2), pp 193-201, 2011. DOI:10.1017/S095410201100068X

[38] Walters, R.A. and Heston, C., Removing tidal period variations from time-series data using low-pass digital filters. Journal of Physical Oceanography, 12, pp. 112-115. 1982. DOI: 10.1175/1520-0485(1982)012<0112:RTPVFT>2.0.CO;2

[39] Willmott, V., Domack, E., Padman, L. and Canals, M., Glaciomarine sediment drifts from Gerlache Strait, Antarctic Peninsula. In: Hambry, M., Christoffersen, P., Glasser, N.F., Hubbard, B. (Eds). Glacial sedimentary processes and products. IAS Special Publication. New York: Blackwells, pp. 67-84. 2007. DOI: 10.1002/9781444304435.ch6.

[40] Wunsch, C. and Stammer, C., Atmospheric loading and the ''inverted barometer'' effect. Reviews of Geophysics, 35, pp. 79-107. 1997. DOI: 10.1029/96RG03037

**B. Jigena-Antelo**, es Ing. Hidrógrafo de ROA-IHM, España, en 1995, Ing. en Organización Industrial en 2006, Lic. en Náutica y Transporte Marítimo en 2011, Diploma de Estudios Avanzados (DEA) en Ingeniería Geodésica, Cartográfica y Fotogrametría, en 2008, todos por la Universidad de Cádiz, España. MSc. en Ingeniería del Agua de la Universidad de Sevilla, en 2009. Desde 1987 ha trabajado en cargos técnicos, directivos y gerenciales en diferentes empresas y organismos técnicos, en áreas de geodesia, topografía, sistemas de información geográfica y teledetección, navegación e hidrología fluvial. Docente desde 1988 y desde 2006 es profesor investigador en el Departamento de Física Aplicada e investigador del Grupo RNM-314 Geodesia y Geofísica Cádiz y en el Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Geofísica e investigador antártico, de la Universidad de Cádiz. Sus líneas de investigación: Modelos geoidales, altimetría y niveles del mar, redes geodésicas y sistemas GPS, Sistemas de información geográfica y teledetección.

**J. Vidal**, es Lic.en Ciencias del Mar en 1994 y Dr. en Ciencias del Mar en 2002 por la Universidad de Cádiz, España. Es profesor del Departamento de Construcciones Navales de la Universidad de Cádiz, España e investigador del grupo RNM-160 (Andalusian Research Plan) adscrito al Centro Andaluz de Ciencia y Tecnologías Marina. Líneas de investigaciones en niveles del mar, modelos hidrodinámicos y aplicaciones medioambientales. Experiencia como técnico especialista y, posteriormente como profesor investigador, en campañas oceanográficas durante más de 15 años. Colaborador e investigador de proyectos antárticos del Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía de la Universidad de Cádiz, España.

**M. Berrocoso-Domínguez**, es licenciado en Ciencias Matemáticas, especialidad de Astronomía, Geodesia y Mecánica Celeste en 1985, por la Universidad Complutense de Madrid, España y Dr. en Matemáticas en 1997, por la Universidad de Cádiz, España. Es profesor titular del área de Astronomía y Geodesia adscrito al Departamento de Matemáticas de la Facultad de Ciencias; investigador principal de proyectos de investigación financiados por el Gobierno de España. Responsable del Grupo de Investigación del área de Recursos Naturales y Medio Ambiente RNM314 Geodesia y Geofísica de la Junta de Andalucía. Líneas de investigación principales: Geodesia clásica y espacial, Satélites GNSS, Deformación tectónica y volcánica, Redes Geodésicas GNSS permanentes.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Medio Ambiente

Oferta de Posgrados

Especialización en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Especialización en Gestión Ambiental
Maestría en Ingeniería Recursos Hidráulicos
Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo
Doctorado en Ingeniería - Recursos Hidráulicos
Doctorado Interinstitucional en Ciencias del Mar

Mayor información:

E-mail: acia_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5105

## Artículo Científico Antarctic Science

*Jigena B., Berrocoso M., Torrecillas C., Vidal J., Barbero I. and Fernández-Ros A.* ***Determination of an experimental geoid at Deception Island (South Shetland Islands, Antarctica). Antarctic Science***

(Aceptado, In Press).

El geoide es una superficie física de referencia vertical y combinando su uso con las medidas GPS y los modelos digitales de elevación (DEM) pueden ser un buen sistema de referencia vertical para hacer previsiones en zonas volcánicas, como ser diseño de modelos de flujo de lava, mapas de peligrosidad y la definición de las áreas de riesgo. Por estas razones, es fundamental determinar un geoide preciso en áreas volcánicas, pues combinando su uso con observaciones GPS podemos obtener de forma directa la altura ortométrica para controlar las deformaciones verticales y horizontales de una manera rápida y precisa.

La isla Decepción es un volcán activo dela época cuaternaria que está situado en el estrecho de Bransfield. Su actividad volcánica ha sido reciente y la presencia de anomalías de la gravedad puede estar vinculada al volcanismo que pueden influir en la definición del geoide.

Evaluación de los parámetros de deformación superficial en áreas volcánicas se hace mediante el análisis de los modelos de deformación horizontales y verticales obtenidos a partir de observaciones GPS. Sin embargo, la falta de significado físico de la altura elipsoidal hace necesario establecer un marco de referencia física y matemática, en este caso es el geoide, a fin de calcular las deformaciones verticales con bastante precisión y rapidez.

En este trabajo hemos determinado un modelo experimental y preciso del geoide en isla Decepción GeoiDEC14, calculado a partir de medidas GPS, gravimétricas y nivelación referidas al nivel medio del mar y corregidas por efectos gravimétricos. Para comprobar los resultados, algunas mediciones fueron tomadas en la cercana isla de Livingston obteniendo valores similares a los de GeoiDEC14 y que afirman los valores obtenidos. Es destacable el hecho de que las anomalías locales de la isla coincidan con los puntos calientes, como los valores mínimos que se observan en Fumarolas Bay y Bahía Balleneros o los valores máximos encontrados en los restos de un flujo de lavas en Colatinas, Glaciar Negro o Punta Murature.

Por otro lado, también hemos hecho una comparación de GeoiDEC14 frente a los modelos globales, como el GRACE2014, EGM08, GRACE03 o EGM96, todos muestran valores negativos de la ondulación del geoide (N) respecto al valor promedio de 18,8 m de nuestro modelo en comparación con los valores promedio de entre 19,8 a 20,6 m para los modelos globales, que podríamos inferir que esta diferencia se debe a la falta de resolución de los modelos globales y también a la actividad volcánica en la isla que determina cambios en su corteza terrestre.

Antarctic Science XX(X), XXX–XXX (2015) © Antarctic Science Ltd 2015 doi:10.1017/XXXXXXXXXXXXXXXX

# Determination of an experimental geoid at Deception Island (South Shetland Islands, Antarctica)

**BISMARCK JIGENA[1, 5], MANUEL BERROCOSO[2, 5], CRISTINA TORRECILLAS[3, 5], JUAN VIDAL[4, 5], IGNACIO BARBERO[5] and ALBERTO FERNANDEZ-ROS[2, 5]**

*1Department of Nautical Sciences and Maritime Studies, University of Cádiz, CP 11510, Puerto Real, Cádiz, Spain*
*2Department of Mathematics, University of Cádiz, CP 11510, Puerto Real, Cádiz, Spain*
*3 Department of Graphic Engineering, University of Seville, CP: 41092, Sevilla.*
*4 Department of Naval Construction, University of Cadiz, CP: 11510, Puerto Real, Cadiz, Spain.*
*5 Astronomy, Geodesy and Cartography Laboratory (LAGC-UCA), University of Cadiz,Faculty of Science, CP: 11510, Puerto Real, Cadiz, Spain*

*bismarck,jigena@gm.uca.es*
*University of Cádiz, CP 11510, Puerto Real, Cádiz, SPAIN*

**Abstract:** Deception Island is an active Quaternary volcano located in the Bransfield Strait. Its volcanic activity is linked to the presence of gravity anomalies that influence the definition of the geoid. In this paper, a precise undulation geoid model (GeoiDEC14) has been computed from GPS, gravimetric and levelling measurements. To check results, some measurements were taken on the nearby Livingston Island. GeoiDEC14 highlights local anomalies of the island that match with hot spots, such as the minimum values shown in Fumaroles Bay and Whalers Bay (fumarole areas), or the maximum values found in the remains of a flow in Colatinas, Black Glacier or Murature Point. Comparison of GeoiDEC14 versus global models, always show negative values due to an average value of 18.8 m for our model compared to average values of between 19.8 to 20.6 m for models such as GRACE2014, EGM08, GRACE03 or EGM96. On the one hand, this difference is due to the lack of resolution of global models, and secondly, due to the volcanic activity on the island. The values of geoid undulation in Livingston reaffirm the lack of detail in the global geoid in the area, presenting an average of 18.9m, according to the average value of GeoiDEC14.

Received 15 January 2015, accepted 02 March 2015, In Press

**Key Words:** Antarctica, geoid, orthometric height, levelling, geoid undulation, mean sea level, Deception Island, Livingston Island

## Introduction

The geoid is a vertical reference system. It can be obtained by combining Global Positioning System (GPS) and gravimetric observations with orthometric heights. The evaluation of the volcanic surface deformation parameters is made by analysing the horizontal and vertical deformation models obtained from GPS observations. However, the lack of physical meaning of the ellipsoidal height makes it necessary to establish a physical and mathematical reference framework, in this case, the geoid, in order to calculate accurate vertical deformations. The geoid, together with the digital elevation models, constitute the main reference system for designing models of lava flows to determine a hazard map and localise risk areas in advance.

Since 1988, Spanish and Argentinian research groups have systematically carried out monitoring of the volcanic and tectonic activities on Livingston and Deception Islands (South Shetland Islands), see (Fig. 1), by means of geodetic and geophysical techniques. In that year, the works were begun to establish the first stations of the REGID (in Spanish Red Geodésica de Isla Decepción) geodetic network in order to study the geodynamic activity on the Deception volcano and its environment (Berrocoso et al. 2006). This monitoring has detected two important volcanic crises in the active Deception Island in December and January, 1991, and in January and February, 1999.

In 1992, the production of the Deception Island topographical map established an initial value of geoid undulation (N) of -13m (CGE 1992). The first experimental geoid for Deception Island, included in the Multidisciplinary Scientific Information Support System (SIMAC) for Deception Island (Berrocoso et al. 2008, Torrecillas et al. 2011), was calculated according to this elevation reference for BARG, see (Fig. 3), and gave a mean N value of -19.59 m in that area in 2008 (Berrocoso et al. 2007, 2012). This value differed from the 1992 value by 6 m.

The first sea level observations at Deception Island were made by the Argentine Antarctic Institute or IAA (in Spanish, Instituto Antártico Argentino) in 1970. Tidal data were obtained over five days in summer, by means of a visual tide staff located close to the BARG geodetic benchmark, in the Argentinian Base "Deception". During the 2001-2002 and 2002-2003 Spanish Antarctic campaigns, the RENID (In Spanish, Red de Nivelación de Isla Decepción) levelling network was established determining the first vertical datum for Deception Island, taking the BARG geodetic benchmark as a fundamental levelling point, with an orthometric height value of 2.547 metres above mean sea level (a.m.s.l.) This orthometric level was translated by geometric levelling to the LN00, the new fundamental levelling point of the RENID network with a value of 5.430 metres a.m.s.l. (Figs. 4 & 6). From this vertical datum, levelling elevation were given at all points of the RENID network (Berrocoso et. al. 2008). Gravimetric observations were carried out at these points, and other locations around Port Foster, with 108 gravimetric points. These were not the first gravimetric measures carried out on the Island, as previous readings were carried out in the terrestrial part in the austral summer of 1999/2000 (Carbó et al. 2001), as a

response to the mentioned seismic crisis that occurred in 1999.

Since 2007, the Laboratory of Astronomy, Geodesy and Cartography of the University of Cadiz (LAGC-UCA) has been carrying out new geometric levelling, trigonometric linkages, GPS observations and observations of tidal data in Livingston and Deception Islands. In the 2007-2008 Spanish Antarctic Campaign, two tidal gauges were installed in LIVMAR, at Livingston Island at Johnson's Dock, a shallow, semi-closed bay situated at the south of the island, near the BEJC geodetic point, see (Fig. 1), and in DECMAR on Deception Island (Colatinas Point), in order to obtain the first tidal constituents and mean sea level for Livingston and Deception Islands.

In 2011, the first results of direct observations of mean sea level based on these data were obtained (Vidal et al. 2012). Subsequently, better results have been obtained in the determination of the mean sea level in Livingston and Deception Islands, making a new adjustment with a two-year time series and calculating a new value of orthometric height for LN00 of 6.20 metres a.m.s.l. (Jigena et al. 2014). A suitable determination of the mean sea level significantly influences the determination of the geoid (Reyes et al. 2015), for that reason these data have been fundamental for the accurate determination of a new local geoid for Deception Island, GeoiDEC2014, which is the result of the present work and which shows an improvement with respect to the results obtained in 2008.

Instrumentation and data

Data were obtained using two moorings, each with a SAIV TD304 bottom pressure sensor at points near the coast, obtaining average local values of depth of the tide gauge of 3.147 m at Deception Island and 7.475 m at Livingston Island. The tidal observations at DECMAR and LIVMAR stations were made between February 2011 and April 2013.

Pressure (P), temperature (T) and conductivity (C) data were recorded at the stations with a CTD SAIV SD 204 sensor that has an accuracy of ± 0.02 ppt for salinity, S, (derived from P, T and C)and ± 0.01°Cfor T. Additionally, AQUAlogger 520 PT were used. These sensors have an accuracy of ± 0.05°C for T and 0.005% of full scale (10 m) for P. The geometric levelling was made using a Leica model NA2 optical level with an accuracy of ± 0.7 mm for one kilometre double run levelling. The GPS data for positioning of benchmarks and stations were taken from Vidal et al. (2012). The gravimetric observations were made with a LaCoste & Romberg model D-203 relative gravimeter.

**Regional setting.**

The South Shetland Islands are the northernmost extremity of Antarctica. Between these and the Antarctic Peninsula is the Bransfield Strait, which represents one of the most interesting geodynamic regions in Antarctica, due to the convergence of several tectonic plates. The strait is about 120 km wide and has a length of about 500 km running in a NE-SW direction between latitudes 60°S and 63°S. It is an active marginal basin occupied by six volcanic edifices aligned approximately along the main direction of the basin. Deception and Livingston Islands are part of the South Shetland Islands, and form the northern boundary of the Bransfield Strait (Fig. 1). This strait is bounded to the southeast by a ridge and to the northwest by a former trench.

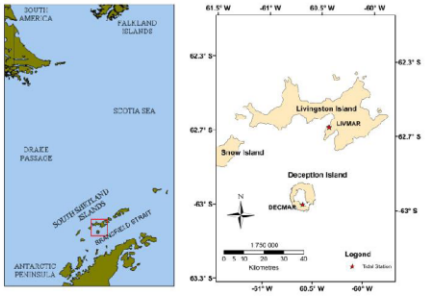



**Fig.1.** Location of the study area (red polygon)

Deception Island is an active volcanic island younger than 0.75 Ma (Valencio et al. 1979). The volcanic sequence that built up Deception Island evolved from submarine pillow lavas to subaerial eruptions, mainly Strombolian and phreatomagmatic (Baker et al. 1975, Smellie 2001, Smellie et al. 2002, Martí et al. 1996, Maestro et al. 2007), indicating that the island actually evolved through the collapse of a huge volcanic edifice under a regional stress. The present landscape shows a horseshoe-shaped island with a flooded, well-developed, collapsed caldera (Fig. 2) of 16 km diameter called Port Foster. Port Foster opens onto Bransfield Strait through a shallow and narrow sill called Neptune's Bellows. Historic volcanism on Deception Island principally affected the inner rim of the volcanic caldera and was associated with fractures with regional orientations (NNW-SSE) (Martí et al. 1996). The caldera boundary and the collapse scarp have affected pre-caldera deposits and the location of post-caldera eruptive centres and cinder cones (Smellie 2001, 2002, Smellie et al. 2002). Eruptions at high elevations were Strombolian, with small magma volumes and durations ranging from hours to days, and some subsequently emitted small lava flows, which flowed towards Port Foster. Eruptions at lower elevations were principally phreatomagmatic or produced maars. Historical eruptions took place in 1842, 1912, 1917, 1967, 1969 and 1970 (Smellie et al. 2002), see (Fig. 2).

Livingston is the second largest island of the South Shetland Islands archipelago and is about 70 km long and varies in width from 4 to 32 km in an east-northeast to west-southwest direction. It is an island without volcano activity.

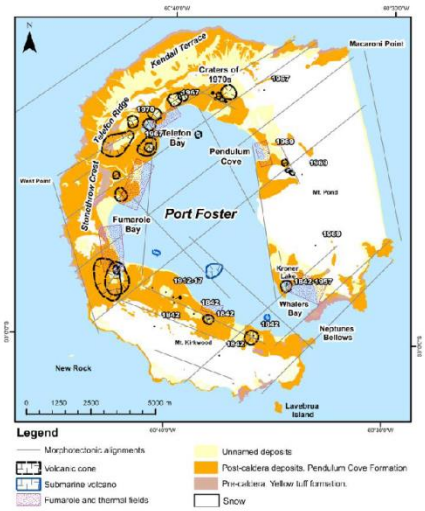



**Fig. 2.** Main geological and volcanological elements and historical eruptions in Deception Island

**Methodology**

The developed method is based on the determination of the geoid undulation (N) from the difference between ellipsoidal height (h) directly obtained by means of GPS observations and orthometric height (H), obtained by geodesic levelling (geometric or trigonometric) and corrected with gravity measurements (Heiskanen & Moritz 1985, Torge 1991, Berrocoso et al. 1996). This methodology was used because, computationally, it is easy to implement, is quite rigorous and demanding regarding the input data, and guarantees the best results in areas with a radius of less than 50 km (Leick, 2004) as opposed to other methodologies such as the Remove-Restore method, provided there is sufficient data densification to guarantee the quantity and quality.

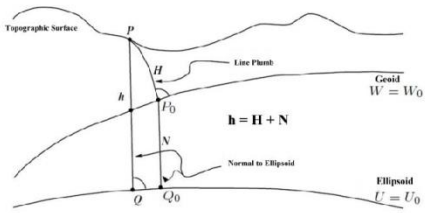



**Fig. 3.** Relationship between the geoid, ellipsoid and topographic surface

Using the geometrical relationship between the geoid undulation (N), the ellipsoidal height (h), and the orthometric height (H), obtained from geometric levelling and corrected for gravimetric effects, the geoid undulations are calculated by means of the well-established formula:

$$h = H + N \qquad (1)$$

Given that the ellipsoidal height (h) is directly obtained from GPS observations, and starting from a point of known orthometric height (h), the problem for the application of the method is reduced to obtaining the orthometric height at the other points, see (Fig 3). Considering that the study area is relatively small, and starting from a point Pi with a known orthometric height (HPi), we can consider that the following point Pj is sufficiently close so as to directly unite them by means of a single section of levelling; in short, to obtain the value of the orthometric height of a point Pj (HPj) knowing the orthometric height at a point Pi, the difference of level between both points, and the value of the gravity at these points, the following equation is used:

$$0.0424 * 10^{-3} H_{P_j}^2 + \overrightarrow{g_{P_i}} H_{P_j} - \left( \overrightarrow{g_{P_j}} \Delta n_{P_{i,j}} + \overrightarrow{g_{P_i}} H_{P_i} + 0.0424 * 10^{-3} H_{P_i}^2 \right) = 0 \qquad (2)$$

The orthometric height $H_{P_j}$ of the point $P_j$ can be calculated from the orthometric height $H_{P_i}$ of the reference point $P_i$, the geometric level difference $\Delta n_{P_{i,j}}$ between Pi and Pj and the values of the absolute gravity, $g_{P_i}$ and $g_{P_j}$, at these points.

Equation (2) is of the second order and solving it gives the value of the orthometric height of the point Pj. Although this equation has two solutions, we know that only one of them will be a valid value, as the other value will be mathematically absurd. In order to arrive at equation (2), we have made a mathematical development according to (Heiskanen & Moritz 1985, Torge 1991, Berrocoso et al. 1996), and used the following values in the calculation:

$\gamma_0^{45°} = 980629.388$ mGal, the normal gravity value in the sea level at a latitude of 45°, which is approximate for the WGS-84 reference ellipsoid

k = 6.67 x 10-11 Nm2 / kg2 in S.I. units, k is the gravitational constant

ρ = 2670 Kg/ m3, density of the crustal

The value used for ρ corresponds to the average value of the continental crustal that was used in the works of (Carbó et al. 2001) for the correction of the gravimetric readings in the terrestrial part of Deception Island.

The associated errors at each point were obtained by applying the errors propagation law to the method for geoid determination. Thus, the total error becomes:

$$\sigma_N = \sigma_h + \sigma_H \qquad (3)$$

where the ellipsoidal height error is obtained from the GPS data processing and the orthometric height error is calculated by means of the following expression:

CAMBRIDGE JOURNALS
http://journals.cambridge.org

$$\sigma_{H_{P_j}} = \frac{1}{R_{i,j}}\left[\left(\frac{R_{i,j} - g_{P_j} + 0.848 \cdot 10^{-4}\Delta n_{P_{i,j}}}{0.848 \cdot 10^{-4}}\,\sigma_{g_{P_j}}\right)^2 + \left(g_{P_j} \cdot \sigma_{\Delta n_{P_{i,j}}}\right)^2 + \left(H_{P_i} \cdot \sigma_{g_{P_i}}\right)^2 + \left(\left(g_{P_i} + 0.848 \cdot 10^{-4}\right)\sigma_{H_{P_i}}\right)^2\right]^{1/2} \quad (4)$$

with Pi being the reference point and known orthometric height and Pj is the computation point. The value of Ri,j is equal to:

$$R_{i,j} = \left[g_{P_j}^2 + 1.696 \cdot 10^{-4}\left(g_{P_j}^2 \cdot \Delta n_{P_{i,j}} + g_{P_i} \cdot H_{P_i} + 0.424 \cdot 10^{-4} H_{P_i}^2\right)\right]^{1/2} \quad (5)$$

In the calculation of errors, the error obtained in the determination of the mean sea level (MSL) at both tide gauge stations was taken into account, which for COLA was ± 0.051 m from DECMAR Station. This error was added to the levelling error between COLA and LN00, obtaining an initial error of 0.088 m for the benchmark LN00, and from this vertex all the points of the RENID network were propagated. In the case of Livingston Island, the error at BEJC was ± 0.084 m from LIVMAR Station and propagated to the three points on this island.

**Equipment, data acquisition and data processing**

In order to determine an experimental geoid, it was necessary to have a complete set of data consisting of GPS observations, levelling data and gravimetric measurements. The data used pertain to the LAGC-UCA taken in different campaigns, from the 1989-1990 and 2012-13 Spanish Antarctic Campaigns. The GNSS-GPS, gravimetric and levelling data were acquired for geodesic and geophysical purposes, for the establishment of geodetic, levelling and gravimetric networks in the Antarctic and mainly in the Deception and Livingston Islands (Berrocoso et al. 2008). From the 2007-2008 until the 2012-13 campaign, the geodetic networks were updated and extended, weather and tidal data were obtained for the determination of the mean sea level, the geodesic reference framework was updated and cartography obtained, these works are detailed in (Torrecillas 2011, Vidal et al. 2012, Berrocoso et al. 2012, and Jigena et al. 2014).

The specific data to use in the calculation of the geoid of Deception Island must comply with the technical and geodesic specifications that guarantee the quality of such, in particular with the following specifications:

- All the geodesic points must be included in a geodesic and/or gravimetric network, designed and established with this intention and whose data have been collected, processed and adapted under geodesic standards. This is the case of the RENID, REGID and REGRID networks.
- Coordinates referenced to a unique reference system with respect to IGS (International GNSS Service) stations. In our case, GPS solutions were used in ITRF2000.0 coordinates for all geodetic points of the REGID, RENID and REGRID networks, processing with respect to the BEGC fundamental geodetic point at Deception Island. The ITRF2000.00 coordinates BEJC geodetic point was obtained with respect to the IGS reference stations, OHI2 and PALM, see section 4.1.
- Orthometric height differences between the points of each network. In our case geometric levelling measurements between the stations of the REGID network, the benchmarks of the RENID network and the set of auxiliary gravimetric points of the REGRID network, taking the levelling benchmark LN00 as the reference point.
- Relative gravimetric values. For Deception Island relative gravimetric measurements in the REGID network stations, in the benchmarks of the RENID network and in the secondary points set, GRAV being the gravimetric base.

The data sets must be filtered and processed and the equipment used in this work must be compliant with the geodetic specifications, which are briefly described below.

*The REGID Geodetic Network*

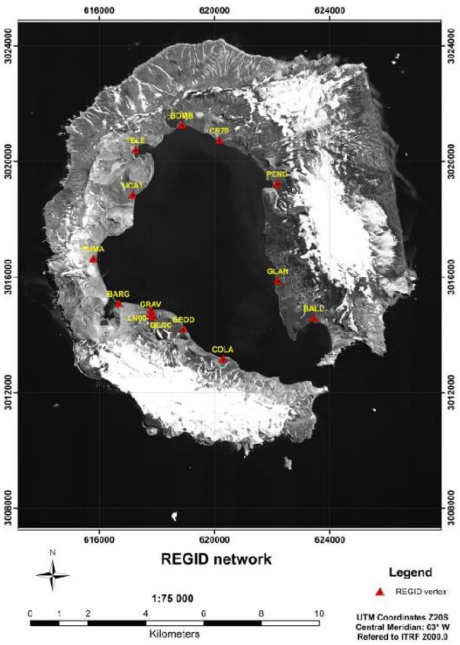



**Figure 4.** The REGID network

The REGID geodetic network is formed by twelve stations distributed all around the island (Fig. 4), COLA at Colatinas Point, GEOD in the surroundings of Soto Crater, BEGC near the Spanish Antarctic Base, Gabriel de Castilla, BARG at the Argentinian Base Deception, FUMA at Fumaroles Bay ,

UCA1 at Obsidian Hill, TELE at Telephone Bay, BOMB in the Volcanic Bombs Field, CR70 in the area of the craters of 1970, PEND at Pendulum Cove, GLAN in the surroundings of the Black Glacier and BALL at Whalers Bay. The LN00 geodetic benchmark was also included as an elevation reference station of the network (Berrocoso et al. 2006, 2008). The design and establishment of the network were planned according to the special characteristics of Deception Island, because the topographic conditions determine that the building of the stations is restricted to areas near the coast.

The REGID geodetic network has been surveyed since 1988 in the successive Antarctic campaigns. It has been used for the study of models of horizontal deformation due to the volcanic and tectonic activity on the island (Berrocoso et al. 2008, Prates et al. 2013). The data used to obtain the ellipsoidal heights correspond to the 2002-03 Antarctic campaign, from November 2002 to February 2003 (Berrocoso et al. 2006, 2008).

The GPS data for positioning of benchmarks and stations were taken from (Berrocoso et al. 2008). The geodetic stations have absolute coordinates in X, Y, Z, and latitude ( ), longitude ( ) and ellipsoidal height (h), relative to ITRF2000 with millimetres of accuracy (Altamimi, Sillard & Boucher, 2002).

The equipment used consisted of Leica GX1230 and TRIMBLE 5700 receivers with an accuracy (RMS), for static surveying (phase) in post processing and standard antenna, equal to 5mm + 0.5ppm in horizontal and 10mm + 0.5ppm in vertical. There were 28 days of observation in the first campaign (1989-1990) and since that campaign they have been increased, with an average of 41 days of observation per campaign, including the 2012-13 Antarctic campaign.

In order to obtain millimetres precision, the GNSS-GPS observations were made by the Static Positioning method, with specifications for geodetic surveying. For this type of surveying it is necessary to have at least one reference station with known precise absolute coordinates. Observation sessions of at least 24 hours were programmed, data were registered with a 1 second sampling rate and the elevation mask was set to 10º. For processing and network adjustment, BERNESE version 5.0 GPS Software (Beutler et al. 2001) was used to obtain a relative position of the network, with respect to the BEGC reference station at the Spanish Base "Gabriel de Castilla". The IGS station OHI2 located in the Antarctic Peninsula, the Chilean Antarctic Base O'Higgins and the PALM station on Anvers Island in the American Antarctic Base Palmer were used as reference in a first stage; from these stations the absolute geocentric coordinates were obtained for BEGC station on Deception Island and BEJC on Livingston Island. The second stage was the processing and adjustment of the coordinates of the remaining stations on Deception Island, made with respect to OHI2 and BEJC (Berrocoso et al. 2008). In data processing, IGS precise orbits and pole files were used for the entire procedure. Baselines were processed using the QIF (Quasi Ionosphere Free) ambiguity resolution strategy and the tropospheric parameters were estimated from a Saastamoinen tropospheric model, as is suggested for GPS data processing in Antarctic regions in (Bouin & Vigny, 2000). The adjustment of the network was carried out in two stages: firstly, absolute geocentric coordinates for the BEGC station at Deception Island were obtained by the processing of the network with the IGS station OHI2 at the Chilean Antarctic Base O'Higgins Station in the Antarctic Peninsula, and the BEJC geodetic station at Livingston Island; secondly, the coordinates of the remaining stations at Deception Island were processed from the coordinates previously obtained for the BEGC reference station with respect to OHI2. The adjusted coordinates of the REGID geodetic network are shown in Table I.

| # | POINT | Latitude S (° ' ") | | | Longitude W (° ' ") | | | h (m) | σφ (m) | σλ (m) | σh (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | BEGC | 62 | 58 | 43.6576 | 60 | 40 | 27.5304 | 82.070 | 0.001 | 0.001 | 0.002 |
| 2 | BALL | 62 | 58 | 38.5553 | 60 | 33 | 52.5089 | 25.968 | 0.003 | 0.001 | 0.006 |
| 3 | FUMA | 62 | 57 | 41.0170 | 60 | 42 | 59.3471 | 22.911 | 0.001 | 0.001 | 0.006 |
| 4 | PEND | 62 | 56 | 09.8456 | 60 | 35 | 34.3437 | 28.841 | 0.001 | 0.001 | 0.003 |
| 5 | COLA | 62 | 59 | 27.9180 | 60 | 37 | 31.8014 | 48.050 | 0.003 | 0.001 | 0.009 |
| 6 | GLAN | 62 | 57 | 58.3621 | 60 | 35 | 23.8528 | 27.541 | 0.003 | 0.003 | 0.012 |
| 7 | GEOD | 62 | 58 | 56.4127 | 60 | 39 | 11.7290 | 42.182 | 0.003 | 0.001 | 0.009 |
| 8 | UCA1 | 62 | 56 | 28.4103 | 60 | 41 | 28.0891 | 28.667 | 0.003 | 0.001 | 0.009 |
| 9 | CR70 | 62 | 55 | 23.6706 | 60 | 38 | 01.0013 | 23.600 | 0.003 | 0.003 | 0.015 |
| 10 | TELE | 62 | 55 | 37.9905 | 60 | 41 | 25.5485 | 22.791 | 0.003 | 0.003 | 0.012 |
| 11 | BOMB | 62 | 55 | 06.4201 | 60 | 39 | 33.8481 | 22.785 | 0.003 | 0.003 | 0.015 |
| 12 | BARG | 62 | 58 | 30.2679 | 60 | 41 | 53.3601 | 22.283 | 0.001 | 0.001 | 0.006 |

**Table I.** The REGID network stations. Coordinates and precisions relative to ITRF2000.0.

The geodetic benchmarks were constructed with concrete, well-rooted in the permafrost with steel bars and a low height above the ground. A 5 cm stainless steel screw for the benchmark materialisation was fixed in the concrete. Moreover, to ensure the correct and known position of the GNSS-GPS antenna centre, with respect to the benchmark at each campaign, a laboratory measured prolongation of nearly 13 cm, was applied to attach the antenna (Prates et al. 2013), for more details see (Fig. 5).

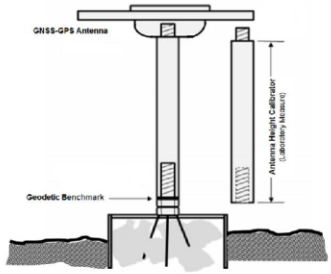



**Fig. 5.** REGID geodetic benchmark. Ground structure

*The RENID Levelling Network*

The RENID levelling network consists of sixty benchmarks and it is divided into 6 independent levelling lines (Fig. 6). The fundamental benchmark is LN00, situated near the Spanish Antarctic Base "Gabriel de Castilla".

over the total levelling distance, within the second-order geodetic levelling. The LN00 point has been defined as the Fundamental Geodetic Benchmark of the REGID Levelling Network in (Berrocoso et al. 2008).

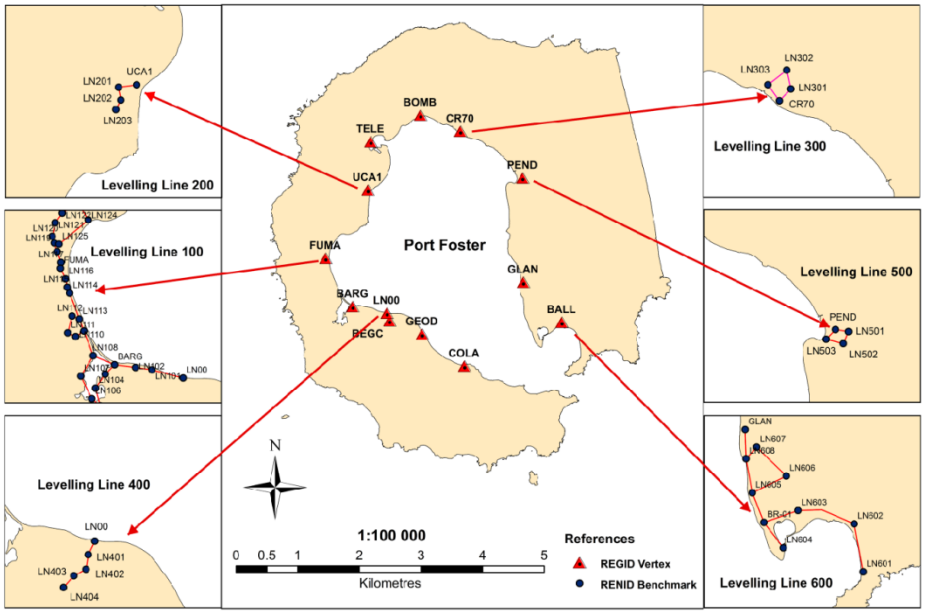



**Figure 6.** The RENID levelling network

The orthometric height of LN00 was determined by a geometric levelling from the COLA geodetic benchmark, with the orthometric height provided from the works carried out by (Vidal et al. 2012, Jigena et al. 2014). Every line is connected to one of the geodetic stations of the REGID network except levelling line 4, which is connected to the fundamental benchmark LN00. (Fig. 6) shows the levelling lines and REGID network which are linked.

Levelling surveys of the RENID networks were carried out during the 2001-02 and 2002-03 Antarctic campaigns. The geometric levelling was undertaken using a Leica optical level model NA2 with an accuracy of ± 0.7 mm/km double run levelling. A Leica TPS 403 Total Station was used in the trigonometric levelling and geodetic linkages. The Leica TPS 403 Total Station has a 1" resolution in angular reading with a standard deviation of 3" for horizontal and vertical angles, and 2 mm + 2 ppm precision in distances over the 3500 m maximum distance with a Leica GPR1 prism. Corrections due to sphericity and refraction effects were applied to the data. The fundamental geodetic benchmarks have the height above mean sea level reference, relative to the COLA geodetic vertex and LN00 benchmark on Deception Island, and relative to the BEJC geodetic vertex on Livingston Island, all of which are referred according to the results obtained by (Jigena et al. 2014). On Deception Island, the orthometric height obtained for COLA was translated to LN00 by geometric levelling, obtaining a closing error of 13.0 mm for 7.209 Km

| LINKAGE | POINT | LEVELLING DIFFERENCE (m) | LEVELLING ERROR (m) | ELEVATION (m.a.m.s.l.) | LEVELLING TYPE |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | LN000 | 0.000 | | 6.200 | |
| | TOCO | -3.640 | 0.0076 | 2.560 | GEOM |
| | COLA | 26.487 | 0.0103 | 29.047 | GEOM |
| 2 | COLA | 0.000 | | 29.047 | |
| | LN604 | -26.758 | 0.023 | 2.289 | TRIG |
| | BR01 | 20.970 | 0.008 | 23.259 | GEOM |
| | COLA | 5.788 | 0.022 | 29.047 | TRIG |
| 3 | LN125 | 0.000 | | 2.077 | |
| | UCA1 | 7.636 | 0.011 | 9.713 | TRIG |
| 4 | UCA1 | 0.000 | | 9.713 | |
| | TELE | -4.907 | 0.071 | 4.806 | TRIG |
| 5 | TELE | 0.000 | | 4.806 | |
| | BOMB | 0.041 | 0.021 | 4.847 | TRIG |
| 6 | BOMB | 0.000 | | 4.847 | |
| | CR70 | -0.178 | 0.022 | 4.669 | TRIG |
| 7 | CR70 | 0.000 | | 4.669 | |
| | PEND | 5.141 | 0.071 | 9.810 | TRIG |

**Table III.** Linkages between levelling lines of the RENID network and their errors obtained.

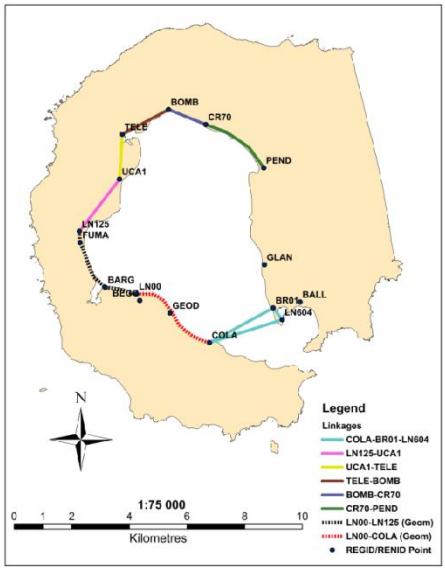



**Fig. 7.** Linkages between levelling lines of the RENID network

The levelling lines are independent, and the elevation of the benchmarks, belonging to each line, were obtained by geometric levelling; however, the linkages between the levelling lines was performed by a trigonometric levelling method, taking measurements with a Leica Total Station model TPS-403, except for the linkage between COLA and LN00 which was performed by geometric levelling. Locations of the linkages are shown in (Fig. 7).

The results obtained for the different linkages are shown in Table III.

The 48 benchmarks of the RENID network were placed over concrete blocks on volcanic rock, the points over concrete block were made according to (Fig. 5), and with a block size of 30 x 30 cm. Benchmarks placed on volcanic rock were constructed with a block of epoxy resin with a 12 cm base and a height of 14 cm. The resin block was fixed on the rock by a variable height stainless steel screw, and the physical materialisation of the geodetic reference point on the benchmark is the top of the screw (Fig. 8); a laboratory measured prolongation of nearly 13 cm was applied to attach the antenna and fix the position with respect to the antenna centre, according (Fig. 5 & 8b).

Table II shows the obtained levelling data as well as their associated errors.

| # | Station | Latitude S (º ' ") | | | Longitude W (º ' ") | | | Δn 2014 (m) | σΔn 2014 (m) | # | Station | Latitude S (º ' ") | | | Longitude W (º ' ") | | | Δn 2014 (m) | σΔn 2014 (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | LN00 | 62 | 58 | 36.2056 | 60 | 40 | 35.8957 | 0.000 | 0.008 | 34 | LN119 | 62 | 57 | 28.0209 | 60 | 43 | 7.5322 | -1.94 | 0.020 |
| 2 | BEGC | 62 | 58 | 43.6576 | 60 | 40 | 27.5304 | 57.025 | 0.003 | 35 | LN120 | 62 | 57 | 24.5739 | 60 | 43 | 10.1855 | -0.38 | 0.020 |
| 3 | BALL | 62 | 58 | 38.5553 | 60 | 33 | 52.5089 | 0.723 | 0.026 | 36 | LN121 | 62 | 57 | 17.4314 | 60 | 43 | 7.3549 | 2.949 | 0.018 |
| 4 | FUMA | 62 | 57 | 41.0170 | 60 | 42 | 59.3471 | -2.771 | 0.007 | 37 | LN122 | 62 | 57 | 12.2873 | 60 | 42 | 59.6374 | 5.776 | 0.018 |
| 5 | PEND | 62 | 56 | 9.8456 | 60 | 35 | 34.3437 | 3.562 | 0.038 | 38 | LN123 | 62 | 57 | 6.5336 | 60 | 42 | 42.2591 | 12.02 | 0.013 |
| 6 | COLA | 62 | 59 | 27.9180 | 60 | 37 | 31.8014 | 22.847 | 0.010 | 39 | LN124 | 62 | 57 | 15.3448 | 60 | 42 | 29.5474 | 0.051 | 0.008 |
| 7 | GLAN | 62 | 57 | 58.3621 | 60 | 35 | 23.8528 | 2.213 | 0.033 | 40 | LN125 | 62 | 57 | 28.5470 | 60 | 43 | 2.0867 | -4.123 | 0.002 |
| 8 | GEOD | 62 | 58 | 56.4127 | 60 | 39 | 11.7290 | 17.018 | 0.014 | 41 | LN201 | 62 | 56 | 30.0095 | 60 | 41 | 48.8256 | 17.845 | 0.009 |
| 9 | UCA1 | 62 | 56 | 28.4103 | 60 | 41 | 28.0891 | 3.513 | 0.032 | 42 | LN202 | 62 | 56 | 36.6164 | 60 | 41 | 45.5859 | 6.567 | 0.011 |
| 10 | CR70 | 62 | 55 | 23.6706 | 60 | 38 | 1.0013 | -1.531 | 0.042 | 43 | LN203 | 62 | 56 | 41.6640 | 60 | 41 | 50.8872 | 12.550 | 0.022 |
| 11 | TELE | 62 | 55 | 37.9905 | 60 | 41 | 25.5485 | -1.394 | 0.068 | 44 | LN301 | 62 | 55 | 17.3106 | 60 | 37 | 48.3141 | 5.757 | 0.046 |
| 12 | BOMB | 62 | 55 | 8.4201 | 60 | 39 | 33.8481 | -1.353 | 0.020 | 45 | LN302 | 62 | 55 | 7.5517 | 60 | 37 | 53.8953 | 19.817 | 0.050 |
| 13 | GRAV | 62 | 58 | 40.5263 | 60 | 40 | 34.0082 | 23.456 | 0.000 | 46 | LN303 | 62 | 55 | 15.5437 | 60 | 38 | 14.8131 | -0.109 | 0.034 |
| 14 | BARG | 62 | 58 | 30.2679 | 60 | 41 | 53.3601 | -2.883 | 0.008 | 47 | LN401 | 62 | 58 | 43.0473 | 60 | 40 | 41.2241 | 4.645 | 0.003 |
| 15 | TOCO | 62 | 59 | 26.3322 | 60 | 37 | 34.0251 | -3.640 | 0.008 | 48 | LN402 | 62 | 58 | 50.7123 | 60 | 40 | 43.2290 | 12.409 | -0.013 |
| 16 | LN101 | 62 | 58 | 32.2136 | 60 | 41 | 10.2854 | 2.136 | 0.003 | 49 | LN403 | 62 | 58 | 54.2936 | 60 | 40 | 56.8809 | 20.640 | -0.020 |
| 17 | LN102 | 62 | 58 | 31.3355 | 60 | 41 | 29.2690 | 8.606 | 0.004 | 50 | LN404 | 62 | 59 | 0.5932 | 60 | 41 | 8.3345 | 32.454 | -0.012 |
| 18 | LN103 | 62 | 58 | 35.3070 | 60 | 42 | 3.8501 | -0.756 | 0.008 | 51 | LN501 | 62 | 56 | 15.0552 | 60 | 35 | 44.5756 | -2.270 | 0.074 |
| 19 | LN104 | 62 | 58 | 42.8213 | 60 | 42 | 14.3732 | -3.485 | 0.014 | 52 | LN502 | 62 | 56 | 16.9665 | 60 | 35 | 24.7448 | 19.396 | 0.056 |
| 20 | LN105 | 62 | 58 | 51.8343 | 60 | 42 | 8.2849 | 4.960 | 0.009 | 53 | LN503 | 62 | 56 | 10.6673 | 60 | 35 | 19.4667 | 26.238 | 0.061 |
| 21 | LN106 | 62 | 58 | 48.3910 | 60 | 42 | 18.2240 | 1.167 | 0.006 | 54 | BR-01 | 62 | 58 | 46.3306 | 60 | 34 | 58.2683 | 17.059 | 0.031 |
| 22 | LN107 | 62 | 58 | 36.8334 | 60 | 42 | 31.6770 | 2.843 | 0.007 | 55 | LN601 | 62 | 59 | 10.0432 | 60 | 33 | 2.2151 | -4.347 | 0.054 |
| 23 | LN108 | 62 | 58 | 25.9484 | 60 | 42 | 18.3389 | 0.266 | 0.000 | 56 | LN602 | 62 | 58 | 45.2830 | 60 | 33 | 14.7469 | 1.785 | 0.050 |
| 24 | LN109 | 62 | 58 | 13.2676 | 60 | 42 | 30.0081 | 3.758 | 0.004 | 57 | LN603 | 62 | 58 | 39.4300 | 60 | 34 | 19.7415 | 8.617 | 0.043 |
| 25 | LN110 | 62 | 58 | 16.3419 | 60 | 42 | 39.1766 | 20.362 | 0.003 | 58 | LN604 | 62 | 58 | 59.1811 | 60 | 34 | 34.8541 | -3.911 | 0.046 |
| 26 | LN111 | 62 | 58 | 14.5447 | 60 | 42 | 48.5352 | 24.279 | 0.001 | 59 | LN605 | 62 | 58 | 31.1053 | 60 | 35 | 12.9326 | 3.668 | 0.048 |
| 27 | LN112 | 62 | 58 | 5.7220 | 60 | 42 | 44.2175 | 10.539 | 0.009 | 60 | LN606 | 62 | 58 | 21.7289 | 60 | 34 | 34.6931 | 7.238 | 0.053 |
| 28 | LN113 | 62 | 58 | 7.0971 | 60 | 42 | 35.7230 | -1.488 | 0.004 | 61 | LN607 | 62 | 58 | 7.2749 | 60 | 35 | 9.8278 | 12.875 | 0.074 |
| 29 | LN114 | 62 | 57 | 53.8232 | 60 | 42 | 47.9024 | -4.002 | 0.008 | 62 | LN608 | 62 | 58 | 13.5512 | 60 | 35 | 21.6130 | 1.995 | 0.070 |
| 30 | LN115 | 62 | 57 | 50.8129 | 60 | 42 | 50.9820 | -4.655 | 0.011 | | | | | | | | | | |
| 31 | LN116 | 62 | 57 | 46.4973 | 60 | 42 | 53.2490 | -3.804 | 0.011 | 201 | BEJC | 62 | 39 | 46.77401 | 60 | 23 | 19.9867 | 0.000 | 0.000 |
| 32 | LN117 | 62 | 57 | 36.4112 | 60 | 42 | 58.0599 | -3.74 | 0.012 | 202 | BEJ1 | 62 | 39 | 46.44273 | 60 | 23 | 16.6494 | 1.025 | 0.002 |
| 33 | LN118 | 62 | 57 | 32.4807 | 60 | 43 | 4.0144 | -2.082 | 0.012 | 203 | TOJO | 62 | 39 | 35.6708 | 60 | 22 | 30.1424 | -9.482 | 0.000 |

CAMBRIDGE JOURNALS
http://journals.cambridge.org

**Fig. 8.** Levelling marks of the RENID network fixed on volcanic rocks. **a.** Elements to construct the levelling mark. **b.** GPS antenna placed on a levelling mark.

| LINKAGE | POINT | LEVELLING DIFFERENCE (m) | LEVELLING ERROR (m) | ELEVATION (m.a.m.s.l.) | LEVELLING TYPE |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | LN000 | 0.000 | | 6.200 | |
| | TOCO | -3.640 | 0.0076 | 2.560 | GEOM |
| | COLA | 26.487 | 0.0103 | 29.047 | GEOM |
| 2 | COLA | 0.000 | | 29.047 | |
| | LN604 | -26.758 | 0.023 | 2.289 | TRIG |
| | BR01 | 20.970 | 0.008 | 23.259 | GEOM |
| | COLA | 5.788 | 0.022 | 29.047 | TRIG |
| 3 | LN125 | 0.000 | | 2.077 | |
| | UCA1 | 7.636 | 0.011 | 9.713 | TRIG |
| 4 | UCA1 | 0.000 | | 9.713 | |
| | TELE | -4.907 | 0.071 | 4.806 | TRIG |
| 5 | TELE | 0.000 | | 4.806 | |
| | BOMB | 0.041 | 0.021 | 4.847 | TRIG |
| 6 | BOMB | 0.000 | | 4.847 | |
| | CR70 | -0.178 | 0.022 | 4.669 | TRIG |
| 7 | CR70 | 0.000 | | 4.669 | |
| | PEND | 5.141 | 0.071 | 9.810 | TRIG |

**Table III.** Linkages between levelling lines of the RENID network and their errors obtained.

*The REGRID Gravimetric Network*

The REGRID gravimetric network was established during the 2002-03 Antarctic campaign using 12 geodetic stations of the REGID network, 50 levelling benchmarks of the RENID network, and 46 auxiliary gravimetric points with a total of 108 gravimetric points on Deception Island (Fig. 9). The fundamental gravimetric point in Deception Island was set up to be GRAV (Berrocoso et. al. 2008), in the surroundings of the Spanish Antarctic Base Gabriel de Castilla, another gravimetric point at Deception Island was TOCO, which is the Tidal Gauge Benchmark (TGBM) for control of DECMAR tidal station, located in Colatinas Point.

The gravimetric points at Livingston Island, BEJC, BEJ1 and TOJO, were also included in the network. BEJC is the fundamental gravimetric point in Livingston Island, BEJ1 is the new geodetic vertex and TOJO is the TGAB for LIVMAR tidal station, located in Johnson's Dock. The three points at Livingston Island were located in the surroundings of the Spanish Antarctic Base "Juan Carlos I", see (Fig. 10).

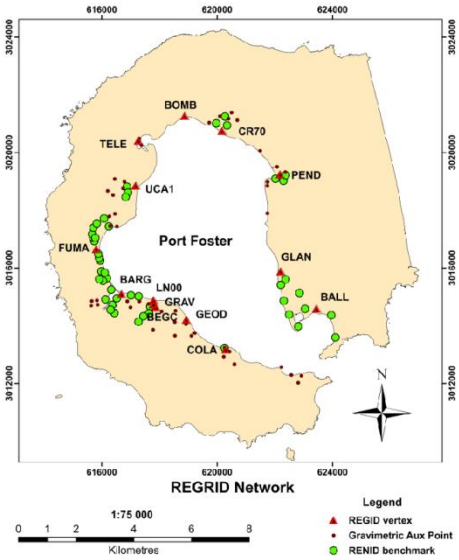



**Fig. 9.** The REGRID network

The Gravimetric Base APPA located on Punta Arenas (Chile) and pertaining to the Chilean Gravimetric Network was used as the Fundamental Gravimetric Base. The gravity value taken in APPA was 981320.810 mGal. The gravimetric connection between the South American continent and the South Shetland Islands was carried out during the 2002-2003 Antarctic campaign, and was made from the APPA gravimetric base (Punta Arenas, Chile) of the Chilean Gravimetric Network up to the BEJC geodetic station (Livingston Island), and thence the connection was made with Deception Island (Berrocoso et al. 2008). The closing of the gravimetric survey was made on return to the South American continent from the Antarctic campaign. The gravity values obtained for the gravimetric connection between the South American Continent and the gravimetric Bases of Livingston and Deception Islands, are shown in Table IV.

| Gravimetric Base (linkage) | Gravity value [mGal] | Standard Deviation [mGal] | Number of linkages |
|---|---|---|---|
| APPA | 981320.8100 | 0.0150 | 1 |
| BEJC | 982212.8190 | 0.1374 | 1 |
| GRAV | 982202.5445 | 0.1866 | 1 |

**Table IV.** Gravity values obtained for the link between the South American continent and the Gravimetric Bases of Livingston and Deception Islands

The fundamental gravimetric point on Deception Island was set up to be GRAV, in the surroundings of the Spanish Antarctic Base Gabriel de Castilla. We included one gravimetric reference point (BEJC) in the network at Livingston Island. Gravimetric measurements were obtained with a Lacoste & Romberg D-203 relative gravimeter, which has a reading precision of ± 0.01 mGal, and a static drift of

less than 1 mGal/month (Berrocoso et al. 2008). Tides, height and drift corrections were applied to the whole set of gravimetric data. The correction for tides was calculated for an average latitude of Deception Island ( || 62º57'30"), constructing a daily correction curve which was applied with its sign to each reading of the gravimeter, based on that of each measurement. The derived correction was controlled by means of the readings made in the base or reference station at the beginning and end of each circuit, supposing that it is linear given that the time between each circuit was generally less than six hours. The correction was distributed proportionally on each circuit, according to the hour of measurement at the station throughout the circuit, obtained with the sign to apply. The correction for tide and drift was made according to (Martin-Furones, 2000). The correction for altitude, due to the variation in the height above mean sea level between the reference point and the measure station, the Free-Air correction and the Bouguer correction were applied according to that specified in (Heiskanen & Moritz, 1985). Gravimetric values and the estimated errors are displayed in Table V.

| # | STATION | GRAVITY (mGal) | σ G (mGal) | # | STATION | GRAVITY (mGal) | σ G (mGal) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | LN00 | 982206.408 | 0.051 | 32 | LN117 | 982205.665 | 0.060 |
| 2 | BEGC | 982196.927 | 0.021 | 33 | LN118 | 982204.907 | 0.077 |
| 3 | BALL | 982204.414 | 0.027 | 34 | LN119 | 982204.557 | 0.092 |
| 4 | FUMA | 982204.912 | 0.026 | 35 | LN120 | 982204.608 | 0.094 |
| 5 | PEND | 982202.237 | 0.022 | 36 | LN121 | 982204.254 | 0.092 |
| 6 | COLA | 982205.580 | 0.035 | 37 | LN122 | 982204.025 | 0.086 |
| 7 | GLAN | 982201.404 | 0.040 | 38 | LN123 | 982203.253 | 0.075 |
| 8 | GEOD | 982203.666 | 0.028 | 39 | LN124 | 982204.803 | 0.058 |
| 9 | UCA1 | 982201.949 | 0.029 | 40 | LN125 | 982205.355 | 0.087 |
| 10 | CR70 | 982201.672 | 0.032 | 41 | LN201 | 982200.860 | 0.078 |
| 11 | TELE | 982204.877 | 0.034 | 42 | LN202 | 982202.698 | 0.078 |
| 12 | BOMB | 982204.710 | 0.038 | 43 | LN203 | 982202.238 | 0.087 |
| 13 | GRAV | 982202.545 | 0.006 | 44 | LN301 | 982200.833 | 0.056 |
| 14 | BARG | 982206.942 | 0.018 | 45 | LN302 | 982199.515 | 0.061 |
| 15 | TOCO | 982205.580 | 0.006 | 46 | LN303 | 982202.097 | 0.051 |
| 16 | LN101 | 982205.937 | 0.059 | 47 | LN401 | 982206.461 | 0.053 |
| 17 | LN102 | 982204.751 | 0.052 | 48 | LN402 | 982205.851 | 0.064 |
| 18 | LN103 | 982206.520 | 0.058 | 49 | LN403 | 982204.553 | 0.065 |
| 19 | LN104 | 982207.415 | 0.077 | 50 | LN404 | 982202.775 | 0.054 |
| 20 | LN105 | 982206.059 | 0.089 | 51 | LN501 | 982203.602 | 0.071 |
| 21 | LN106 | 982207.936 | 0.096 | 52 | LN502 | 982200.069 | 0.075 |
| 22 | LN107 | 982205.767 | 0.100 | 53 | LN503 | 982198.328 | 0.057 |
| 23 | LN108 | 982206.612 | 0.102 | 54 | BR-01 | 982200.614 | 0.053 |
| 24 | LN109 | 982205.950 | 0.100 | 55 | LN601 | 982205.191 | 0.049 |
| 25 | LN110 | 982203.095 | 0.096 | 56 | LN602 | 982204.490 | 0.051 |
| 26 | LN111 | 982202.109 | 0.089 | 57 | LN603 | 982203.097 | 0.052 |
| 27 | LN112 | 982204.271 | 0.077 | 58 | LN604 | 982205.008 | 0.050 |
| 28 | LN113 | 982206.870 | 0.059 | 59 | LN605 | 982202.019 | 0.066 |
| 29 | LN114 | 982206.167 | 0.053 | 60 | LN606 | 982202.965 | 0.068 |
| 30 | LN115 | 982206.008 | 0.061 | 61 | LN607 | 982200.233 | 0.050 |
| 31 | LN116 | 982205.614 | 0.054 | 62 | LN608 | 982201.389 | 0.061 |

**Table V.** The REGRID network, gravimetric measurements and estimated errors

The orthometric heights (H) were calculated from the ellipsoid height (h), obtained from the GPS measurements, absolute gravity measurements (g) and the geometric levelling differences (□n), according to (Heiskanen & Moritz 1985, Berrocoso et al. 1996, 2008).

Sea level measurements were linked to fixed onshore benchmarks by comparing simultaneous readings of the gauges, against a previously levelled shore-based tidal staff. Using precise geodetic levelling, the heights of TGBMs were calculated relative to the heights of nearby geodetic stations, COLA and LN00 in Deception Island and BEJC geodetic vertex in Livingston Island, calculating the new values of orthometric height according to the results obtained in (Jigena et al. 2014). The TGBM TOCO (Deception Island) and TOJO (Livingston Island) were used as benchmarks, from which the orthometric levels of the nearby geodetic stations, COLA and LN00 at Deception Island and BEJC at Livingston Island, were obtained. The final values of gravimetric measurements in Deception Island are shown in Table V.

*Complementary observations*

Other complementary measurements were carried out in the networks of Deception Island in order to use all the stations and benchmarks for any geodetic and geodynamics application, in this instance, the precise local geoid determination.

| # | PUNTOS | Lat S (° ' ") | | | Long W (° ' ") | | | h (m) | G | σG |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | EG01 | 62 | 58 | 48.1094 | 60 | 40 | 12.3818 | 78.456 | 982198.173 | 0.055 |
| 2 | EG02 | 62 | 59 | 01.2970 | 60 | 39 | 11.4625 | 71.178 | 982199.122 | 0.066 |
| 3 | EG03 | 62 | 59 | 30.2762 | 60 | 37 | 21.8428 | 52.532 | 982205.529 | 0.057 |
| 4 | EG05 | 62 | 59 | 53.8791 | 60 | 34 | 47.5026 | 20.146 | 982209.584 | 0.053 |
| 5 | EG06 | 62 | 58 | 37.6953 | 60 | 41 | 07.9465 | 39.988 | 982204.119 | 0.053 |
| 6 | EG07 | 62 | 58 | 43.2210 | 60 | 42 | 50.4931 | 69.735 | 982197.927 | 0.053 |
| 7 | EG09 | 62 | 57 | 14.5726 | 60 | 42 | 26.6680 | 25.443 | 982204.825 | 0.057 |
| 8 | EG10 | 62 | 56 | 31.9871 | 60 | 41 | 58.0812 | 52.152 | 982200.187 | 0.062 |
| 9 | EG11 | 62 | 55 | 35.7940 | 60 | 41 | 22.7860 | 28.703 | 982204.052 | 0.053 |
| 10 | EG13 | 62 | 55 | 09.7657 | 60 | 37 | 45.4646 | 36.296 | 982200.685 | 0.062 |
| 11 | EG14 | 62 | 56 | 07.0910 | 60 | 35 | 20.8290 | 50.980 | 982198.213 | 0.071 |
| 12 | G02 | 62 | 58 | 46.7819 | 60 | 39 | 38.2754 | 112.127 | 982190.083 | 0.065 |
| 13 | G03 | 62 | 59 | 08.8696 | 60 | 40 | 31.9497 | 104.678 | 982195.895 | 0.053 |
| 14 | G04 | 62 | 59 | 14.7016 | 60 | 39 | 37.4031 | 82.573 | 982199.635 | 0.065 |
| 15 | G07 | 62 | 58 | 59.4249 | 60 | 39 | 39.0242 | 52.816 | 982203.413 | 0.055 |
| 16 | G09 | 62 | 59 | 14.1399 | 60 | 38 | 56.6499 | 57.371 | 982202.777 | 0.067 |
| 17 | G10 | 62 | 59 | 10.8855 | 60 | 38 | 48.9905 | 35.889 | 982205.576 | 0.057 |
| 18 | G11 | 62 | 59 | 44.1112 | 60 | 37 | 08.5360 | 80.317 | 982199.422 | 0.062 |
| 19 | G12 | 62 | 59 | 36.1861 | 60 | 37 | 35.4294 | 89.251 | 982201.818 | 0.053 |
| 20 | G14 | 62 | 59 | 45.3668 | 60 | 36 | 12.4746 | 27.704 | 982208.779 | 0.053 |
| 21 | G15 | 62 | 59 | 54.2475 | 60 | 34 | 22.3007 | 41.089 | 982205.265 | 0.064 |
| 22 | G16 | 63 | 0 | 02.2716 | 60 | 34 | 29.7894 | 59.787 | 982201.591 | 0.064 |
| 23 | G17 | 62 | 58 | 38.1730 | 60 | 41 | 37.8158 | 80.573 | 982197.149 | 0.064 |
| 24 | G18 | 62 | 58 | 40.1888 | 60 | 40 | 45.1809 | 51.776 | 982202.092 | 0.052 |
| 25 | G19 | 62 | 58 | 44.8427 | 60 | 41 | 29.3256 | 97.453 | 982194.442 | 0.064 |
| 26 | G20 | 62 | 58 | 38.3412 | 60 | 42 | 52.5674 | 58.462 | 982200.199 | 0.054 |
| 27 | G21 | 62 | 58 | 39.2400 | 60 | 43 | 06.2908 | 80.672 | 982196.137 | 0.065 |
| 28 | G22 | 62 | 58 | 44.3870 | 60 | 43 | 06.3874 | 60.864 | 982199.178 | 0.065 |
| 29 | G26 | 62 | 57 | 03.9356 | 60 | 42 | 29.2077 | 47.694 | 982201.559 | 0.065 |
| 30 | G27 | 62 | 57 | 00.8922 | 60 | 42 | 15.8027 | 80.152 | 982195.785 | 0.066 |
| 31 | G28 | 62 | 57 | 14.9726 | 60 | 42 | 09.9771 | 19.951 | 982205.054 | 0.053 |
| 32 | G31 | 62 | 56 | 24.6032 | 60 | 41 | 55.3321 | 69.506 | 982196.543 | 0.062 |
| 33 | G32 | 62 | 56 | 21.8587 | 60 | 42 | 19.3941 | 103.483 | 982191.824 | 0.087 |
| 34 | G33 | 62 | 56 | 35.4428 | 60 | 42 | 35.5984 | 87.088 | 982195.299 | 0.092 |
| 35 | G34 | 62 | 56 | 39.9117 | 60 | 42 | 22.1502 | 70.898 | 982197.392 | 0.092 |
| 36 | G35 | 62 | 55 | 42.7556 | 60 | 41 | 17.3589 | 23.395 | 982204.237 | 0.049 |
| 37 | G42 | 62 | 55 | 14.9427 | 60 | 38 | 32.1780 | 23.961 | 982202.504 | 0.061 |
| 38 | G43 | 62 | 55 | 07.3829 | 60 | 38 | 06.7445 | 42.856 | 982199.992 | 0.073 |
| 39 | G44 | 62 | 55 | 02.8139 | 60 | 37 | 38.3307 | 63.968 | 982196.250 | 0.077 |
| 40 | G45 | 62 | 55 | 11.1201 | 60 | 37 | 23.6366 | 45.943 | 982198.709 | 0.073 |
| 41 | G48 | 62 | 56 | 01.4956 | 60 | 35 | 41.7043 | 26.274 | 982202.010 | 0.057 |
| 42 | G49 | 62 | 55 | 44.3922 | 60 | 36 | 24.7356 | 24.443 | 982201.488 | 0.055 |
| 43 | G53 | 62 | 56 | 18.9500 | 60 | 36 | 03.6615 | 60.691 | 982197.149 | 0.065 |
| 44 | G55 | 62 | 56 | 23.2707 | 60 | 36 | 03.9003 | 56.375 | 982198.337 | 0.065 |
| 45 | G57 | 62 | 56 | 54.0885 | 60 | 36 | 01.2493 | 18.737 | 982204.579 | 0.053 |
| 46 | TOCO | 62 | 59 | 26.3322 | 60 | 37 | 34.0251 | 21.563 | 982205.580 | 0.011 |

**Table VI.** REGRID Auxiliary Gravimetric Points

In addition to the GPS observations, levelling and gravimetric measurements, the stations of the REGID network were linked to the RENID network by geometric or trigonometric levelling, see (Fig. 7). These stations are thus provided with levelling measurements, and the new values were adjusted with respect to the fundamental benchmark LN00, and are shown in Table II. Similarly, every levelling benchmark is provided with geodetic coordinates obtained by static positioning with BEGC as the reference station. Also, every benchmark in the REGRID network is provided with geodetic coordinates obtained by GPS fast-static

positioning, an absolute gravity value and levelling measurements.

The adverse geographic conditions of Deception Island, with glaciers near the shore and the inaccessible outer coast, forced the REGID, RENID and REGRID networks to be developed around the inner bay, not further than one kilometre from the coast line, as shown in (Fig. 7). In order to spread the observations to the outer area and to make the measurement set more dense, 46 secondary points were also established (Fig. 9) and GPS observations, levelling and gravimetric measurements were obtained for these marks, as shown in Table VI.

Every point was positioned in fast-static mode, using a TRIMBLE 5700 dual frequency receiver, while levelling tasks were carried out using a Leica TPS-403 Total Station, as seen in the case of the REGID, RENID and REGRID networks.

*Measurements on Livingston Island*

On Livingston Island, a new and more accurate orthometric height is provided for the geodetic vertex BEJC, pertaining to the RGAE (in Spanish Red Geodésica Antártica Española) network and the REGID network. The absolute GPS coordinates of this station were established with respect to the IGS stations OHI2 situated on the Antarctic Peninsula (Chilean Antarctic Base O' Higgins) and PALM situated on Anvers Island (United States Antarctic Base Palmer), and the GPS solutions were given in the ITRF2000.0 reference system.

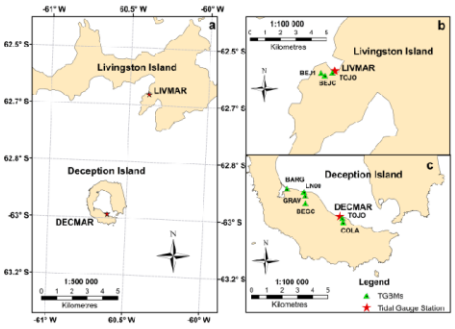



**Fig. 10.** **a.** Location of Tidal Gauge Stations in Livingston and Deception Islands. **b.** Detailed map of Livingston Island showing the location of LIVMAR. **c.** Detailed map of Deception Island showing the location of DECMAR. b & c are showing the Tidal Gauge Station and their related TGBMs.

Other geodetic benchmarks on the island were the BEJ1 and TOJO. These three points have served to determine the levelling height relative to mean sea level, with respect to BEJC, and to later determine the geoid undulation (N) in the area surrounding the Juan Carlos I Antarctic Base. The BEJC geodetic station is the fundamental geodetic vertex on Livingston Island for geodetic, levelling and gravimetric measurements, and pertaining to the RGAE network, installed during the 1987/1988 campaign was used in the vicinity of the Spanish Antarctic Base "Juan Carlos I". Also used was the BEJ1 geodetic vertex, installed to replace the previous one, which was affected by the construction of the new Spanish Antarctic Base "Juan Carlos I". Another geodetic benchmark used was TOJO, which is the TGBM point control of LIVMAR gauge station and is located in Johnsons Dock, for more detail of the location of the geodetic marks (see Figs 1 & 10).

In order to establish these three geodetic points, the following specifications were considered:

- The ITRF 2000.00 coordinates of the BEJC geodetic point were obtained with respect to the OHI2 and PALM IGS stations. The GPS solutions to be given in ITRF2000.0 coordinates in all stations.
- The coordinates for all geodetic points on Livingston Island were processed with respect to the BEJC geodetic vertex and the BEGC fundamental geodetic point at Deception Island.
- Geometric levelling measurements between the BEJC station and the other stations (BEJ1 and TOJO) were taken with respect to the levelling benchmark BEJC as reference point.
- Relative gravimetric measurements in the stations on the island were set relative to the BEJC gravimetric base.

*Tide Gauge Benchmark (TGBM) control points*

For the geoid calculation, we also used the benchmarks for control of tide gauge stations, called Tide Gauge Benchmarks (TGBM). These points are COLA and LN00 in Deception Island, and BEJC in Livingston Island. Furthermore, Tide Gauge Auxiliary Benchmarks (TGABs) were used, these are TOCO located in Colatinas Point (Deception Island) and TOJO located in Johnson's Dock (Livingston Island). From these points the levelling height relative to mean sea level was given to geodetic benchmarks COLA, and LN00 at Deception Island, and BEJC at Livingston Island, for a more detailed explanation (see Fig. 2 in Vidal et al. 2012, Jigena et al. 2014) and (Figs 1 & 10).

The mean sea level results obtained in the geodetic reference stations by (Jigena et al. 2014), were 12.42 metres a.m.s.l. for BEJC, and 29.05 metres a.m.s.l. for COLA, and the associated errors were ± 0.08 m and ± 0.05 m, respectively; for Deception Island the fundamental benchmark was LN00, the orthometric height value of which was 6.20 metres a.m.s.l. with an error ± 0.088 m. These values were taken as fundamentals for the new height calculation and adjustment of the REGID, RENID and REGRID networks, improving their precision. These new values were used to make the calculations and the determination of the experimental geoid of Deception Island, GeoiDEC14.

**Results**

| # | STATION | N 2014 (m) | σN 2014 (m) | # | STATION | N 2014 (m) | σN 2014 (m) | # | STATION | N 2014 (m) | σN 2014 (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | LN00 | 18.93 | 0.06 | 35 | LN122 | 18.59 | 0.09 | 69 | EG11 | 18.93 | 0.16 |
| 2 | BEGC | 18.74 | 0.06 | 36 | LN123 | 18.09 | 0.08 | 70 | EG13 | 18.91 | 0.16 |
| 3 | BALL | 19.16 | 0.09 | 37 | LN124 | 18.65 | 0.08 | 71 | EG14 | 18.93 | 0.16 |
| 4 | FUMA | 19.49 | 0.07 | 38 | LN125 | 18.55 | 0.07 | 72 | G02 | 18.47 | 0.16 |
| 5 | PEND | 19.08 | 0.10 | 39 | LN201 | 18.93 | 0.07 | 73 | G03 | 18.49 | 0.16 |
| 6 | COLA | 18.92 | 0.08 | 40 | LN202 | 18.90 | 0.07 | 74 | G04 | 18.56 | 0.16 |
| 7 | GLAN | 19.08 | 0.10 | 41 | LN203 | 18.88 | 0.08 | 75 | G07 | 18.83 | 0.16 |
| 8 | GEOD | 18.90 | 0.08 | 42 | LN301 | 18.98 | 0.11 | 76 | G10 | 18.87 | 0.16 |
| 9 | UCA1 | 18.98 | 0.10 | 43 | LN302 | 18.92 | 0.11 | 77 | G14 | 19.31 | 0.16 |
| 10 | CR70 | 18.96 | 0.12 | 44 | LN303 | 19.14 | 0.10 | 78 | G15 | 19.25 | 0.16 |
| 11 | TELE | 18.99 | 0.14 | 45 | LN401 | 18.39 | 0.07 | 79 | G16 | 19.22 | 0.16 |
| 12 | BOMB | 18.98 | 0.09 | 46 | LN402 | 18.61 | 0.08 | 80 | G17 | 18.83 | 0.16 |
| 13 | GRAV | 18.90 | 0.07 | 47 | LN403 | 19.03 | 0.10 | 81 | G18 | 18.90 | 0.16 |
| 14 | LN101 | 18.93 | 0.06 | 48 | LN404 | 18.72 | 0.09 | 82 | G20 | 18.84 | 0.16 |
| 15 | LN102 | 18.89 | 0.07 | 49 | LN501 | 18.74 | 0.14 | 83 | G21 | 18.78 | 0.16 |
| 16 | LN103 | 18.92 | 0.07 | 50 | LN502 | 18.53 | 0.13 | 84 | G22 | 18.84 | 0.16 |
| 17 | LN104 | 18.96 | 0.08 | 51 | LN503 | 19.04 | 0.13 | 85 | G26 | 18.94 | 0.16 |
| 18 | LN105 | 18.90 | 0.08 | 52 | BR-01 | 18.18 | 0.10 | 86 | G27 | 18.88 | 0.16 |
| 19 | LN106 | 18.94 | 0.07 | 53 | LN601 | 18.68 | 0.13 | 87 | G28 | 19.01 | 0.16 |
| 20 | LN107 | 18.92 | 0.07 | 54 | LN602 | 18.51 | 0.12 | 88 | G31 | 18.82 | 0.16 |
| 21 | LN108 | 18.91 | 0.06 | 55 | LN603 | 18.71 | 0.11 | 89 | G32 | 18.86 | 0.16 |
| 22 | LN109 | 18.91 | 0.07 | 56 | LN604 | 18.14 | 0.12 | 90 | G33 | 18.93 | 0.16 |
| 23 | LN110 | 18.88 | 0.07 | 57 | LN605 | 18.27 | 0.12 | 91 | G34 | 18.91 | 0.16 |
| 24 | LN111 | 18.89 | 0.07 | 58 | LN606 | 19.01 | 0.12 | 92 | G35 | 18.95 | 0.16 |
| 25 | LN112 | 18.94 | 0.07 | 59 | LN607 | 18.35 | 0.15 | 93 | G42 | 18.99 | 0.16 |
| 26 | LN113 | 18.94 | 0.07 | 60 | LN608 | 18.70 | 0.14 | 94 | G43 | 18.92 | 0.16 |
| 27 | LN114 | 18.94 | 0.07 | 61 | EG01 | 19.96 | 0.16 | 95 | G44 | 18.88 | 0.16 |
| 28 | LN115 | 18.61 | 0.08 | 62 | EG02 | 18.80 | 0.16 | 96 | G45 | 18.90 | 0.16 |
| 29 | LN116 | 18.59 | 0.09 | 63 | EG03 | 19.09 | 0.16 | 97 | G48 | 18.99 | 0.16 |
| 30 | LN117 | 18.96 | 0.08 | 64 | EG05 | 19.25 | 0.16 | 98 | G49 | 19.04 | 0.16 |
| 31 | LN118 | 18.36 | 0.08 | 65 | EG06 | 18.87 | 0.16 | 99 | G53 | 18.91 | 0.16 |
| 32 | LN119 | 18.05 | 0.09 | 66 | EG07 | 18.81 | 0.16 | 100 | G55 | 18.86 | 0.16 |
| 33 | LN120 | 18.17 | 0.09 | 67 | EG09 | 18.94 | 0.16 | 101 | G57 | 18.87 | 0.16 |
| 34 | LN121 | 18.69 | 0.09 | 68 | EG10 | 18.89 | 0.16 | 102 | TOCO | 19.01 | 0.07 |

**Table VII.** Geoid undulation values and corresponding errors obtained for GeoiDEC14

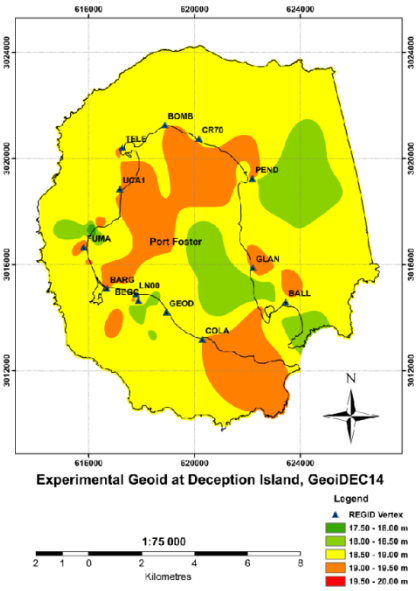



**Fig. 11.** GeoiDEC14

A precise geoid, GeoiDEC2014, was obtained for Deception Island, as well as three geodetic benchmarks being provided with values of geoid undulation (N) for the area of the Spanish Antarctic Base Juan Carlos I and Johnson's Dock in Livingston Island. These values and their estimated errors are shown in Tables VII & IX, respectively. The errors represent the standard deviation with respect to the mean value of the geoid undulation (N) in each island.

Fig. 11 shows the geoid undulation (N) of Deception Experimental Geoid GeoiDEC2014, obtained in metres, using heterogeneous data and according to the method explained in section 3. The contour map was obtained by interpolating these data for the whole island, as well as their errors, which are shown in Fig. 12. It is important to note that this error map does not contain information about the accuracy of the interpolation method used, that is, it only shows the error propagation without taking into account errors due to the interpolation technique.

The Spline Tension method was the interpolation technique used to obtain the map of curves. This method controls the stiffness of the surface according to the character of the modelled phenomenon. It creates a less smooth surface, with values more closely constrained by the sample data range. The contour map was obtained using ArcGIS 9.3 software from ESRI Inc., (for more details see Esri Inc. 2008).

The estimation of errors was made by applying the equations (3, 4, & 5), whose development was made by the LAGC-UCA applying the law of errors propagation. The errors in metres obtained in the geoid undulation calculation are shown in (Fig. 12). Note that the greatest errors were

obtained at Craters 70, Pendulum Cove and Collins Point areas, while at the Whalers Bay area a trend change was observed. This can be attributed to a better fitting network due to mixed linkage (geometric and trigonometric levelling) between the COLA geodetic vertex (Colatinas) and the LN604 and BR01 geodetic benchmarks (Whalers Bay), which has improved the accuracy of the results. Absolute errors range from 0.09 to 0.17 metres around the island. In order to obtain absolute errors, the levelling errors have been added to the error obtained for the determination of MSL, which is 0.051 metres for the COLA benchmark.

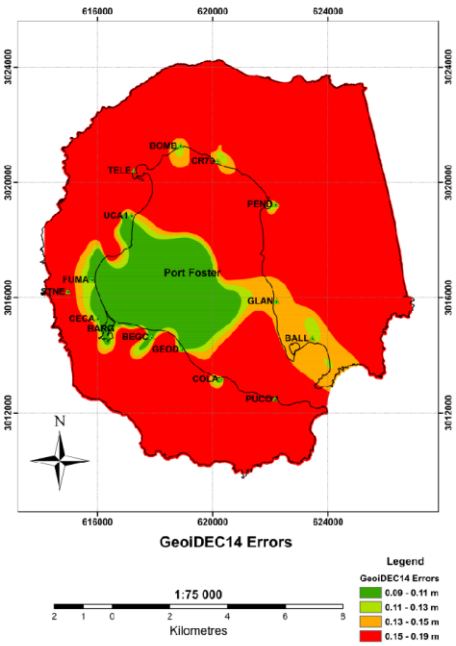



**Fig. 12.** GeoiDEC14 errors

The estimated errors in GeoiDEC14 do not exceed 0.20 m and can be grouped into three areas and were estimated according to equation (3).

| AREA | ERROR (m) |
|---|---|
| Colatinas Point, Gabriel de Castilla Base, Argentine Base, Fumarole Bay, Obsidianas Field, Pendulum Cove | 0.09 - 0.11 |
| Bombs Field, Crater's 70 Field, Black Glacier | 0.11 - 0.15 |
| Telephon Bay, Collins Point, Lobera Beach | 0.15 - 0.19 |

**Table VIII.** GeoiDEC14, estimated errors grouped by areas

Table VIII shows the errors grouped by areas.

Also, three points fitted with geoid undulation (N), elevation and GNSS absolute coordinates, for the area of the Spanish Antarctic Base Juan Carlos I and Johnson's Dock at Livingston Island were obtained, as they are very close points the solution is not relevant for cartographic representation and not sufficient for the determination of a local geoid in this area. The error estimated in the elevation determination regarding MSL for BEJC was 0.088 metres. This error was extrapolated to all points, adding it to the errors obtained in the geometric levelling. Table IX shows the results of these observations in Livingston Island and the locations of the stations are shown in Fig. 10.

| # | STATION | Latitude S (º ' ") | | | Longitude W (º ' ") | | | $N_{2014}$ (m) | $\sigma N_{2014}$ (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 201 | BEJC | 62 | 39 | 46.7792 | 60 | 23 | 19.9940 | 18.808 | 0.085 |
| 202 | BEJ1 | 62 | 39 | 46.4427 | 60 | 23 | 16.6494 | 18.905 | 0.087 |
| 203 | TOJO | 62 | 39 | 35.6708 | 60 | 22 | 30.1424 | 18.917 | 0.101 |

**Table IX.** Experimental values of N obtained for Livingston Island

## Discussion

The importance of this work lies in it being the first model of a precise local geoid obtained for the volcanic Deception Island, which allows technical and scientific work to be undertaken which produce results with a high level of precision. As the model is precise it will be able to be used for the calibration of global geopotential models, as well as for the direct determination of orthometric heights, combining the model with GPS observations, and to be used in volcanic deformation models, for designing lava flow models to determine a hazard map and localize risk areas in advance, oceanography and control of sea levels, and direct surveying with GPS and geophysical applications.

For the determination of the geoid of Deception Island, gravity observations were made on the vertices of the REGRID network, which includes all the points of the REGID geodesic network and the RENID levelling network, all with ITRF2000.0 coordinates and orthometric height. To obtain the precise local geoid model, GeiDEC14, we used GPS/levelling/gravity methodology, having had a total of 108 points available on Deception Island distributed homogenously in the interior part of the island, around Port Foster. These points have an average value in geoid undulation (N) of 18.83 metres, and are the only points of the inner bay with ranges of values between 18.05 and 19.49 metres.

Also, three points were obtained on Livingston Island, located in the area of the Antarctic Base Juan Carlos I and Johnsons Dock. These three points provided an average value similar to that of Deception Island, 18.87 metres, giving validity to the results in principle.

The geoid heights were obtained from several global geopotential models such as the EGM96 (Lemoine et al. 1998), EGM2008 (Pavlis et. al. 2008), GRACE 2003 (Fecher et al. 2015, Pail et al. 2010), GRACE 2014 (Mayer-Guerr et al. 2014), and, in addition, the experimental geoid of Deception Island obtained in 2007, DEC2007 (Berrocoso et al. 2006), in order to present and analyse the differences with respect to the experimental geoid GeoiDEC14. Figure 13, shows the comparisons between the data of EGM96, EGM2008, AUIB-Grace2003s and ITSG-Grace2014s, according to interpolated data obtained from a grid of 0.001° using the tools of the Calculation Service of the International Centre for Global Earth Models (ICGEM). The calculated geoid has also been introduced in (Fig. 13c & f) to show its influence in EGM08 and GRACE2014s. It can be observed how our geoid reduces the undulation value of the geoid in some areas, to values of 18m, a value not reached in any of the studied global geoids.

Specifically, this comparison shows a maximum difference of the minimum N value, determined at the observed points, of about 2.5 m with respect to the oldest global models EGM96, GRACE03 and EGM2008 (Fig. 13a, b & d) and of 1.9 m with respect to the most modern DEC2007 and GRACE2014 (Fig. 13e), see Table X.

The maximum values also differ between both groups, with the maximum value in our geoid being between 0.8 and 1.1m lower with respect to EGM96, GRACE03 and EGM08 and increasing to values of ± 0.3 m, with respect to DEC2007 and GRACE2014, this latter value being near the maximum error of 0.2 m considered for the new geoid.

GeoiDEC2014 generally presents lower N values with respect to the geoids compared, and in all cases the maximum value of GeoiDEC14 is lower than the mean average value of each geoid compared (Table X.A). Furthermore, the range average of the compared models regarding GeoiDEC14 was from -1.7 meters (EGM96, GRACE03 and EGM2008) to -0.9 m (DEC2007 and GRACE2014), showing a better fit in these two latter models regarding GeoiDEC14. The standard deviations stay very similar in all the global models.

The differences of these four geoid models, with respect to the EIGEN6C4 geoid, the latest geoid offered by the GFZ (German Research Centre for Geoscience), does not exceed 0.15 cm in the case of EGM08 for 160 degrees, 0.3 m in the worst case for GRACE2014s for 200 degrees and 0.05 m for AIUG-GRACE03s for 160 degrees. The data, which this Centre offers with respect to 12224 GPS / levelling points, come from Canada, the USA, Europe, Japan and Australia, and offer a root mean square (rms) of 0.43m,

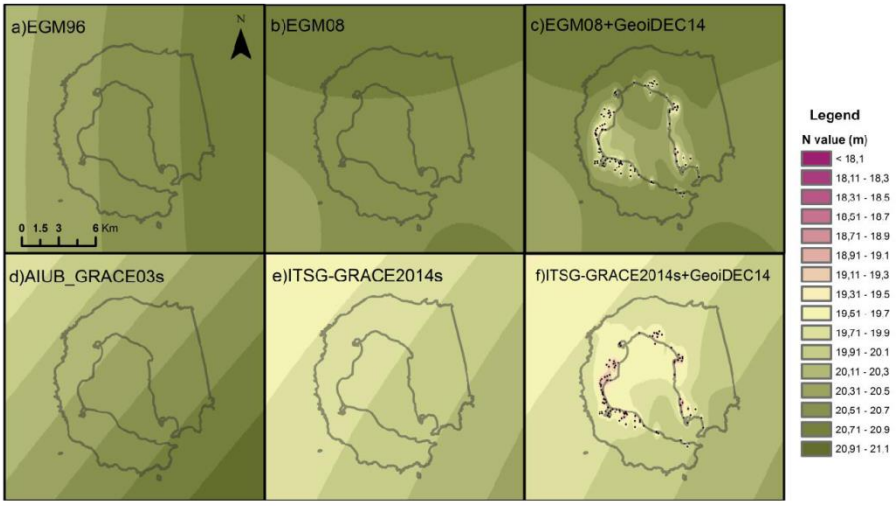



**Fig. 13.** N Values according to **a)** EGM96 **b)** EGM08 **d)** AIUB_GRACE03s **e)** ITSG-GRACE2014s. **c)** and **f)** show the insertion of GeoiDEC14 within EGM08 and GRACE2014

| | A. Statistical Summary | | | | | | B. Range differences regarding to GeoiDEC14 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | GeoiDEC14 | DEC2007 | EGM96 | GRACE2003 | EGM2008 | GRACE2014 | dif N-EG96 | dif N-GR03 | dif N-EG08 | dif N-GR14 | dif N-DEC2007 |
| MAX | 19.49 | 20.37 | 20.69 | 20.70 | 20.73 | 20.08 | -0.96 | -0.81 | -1.12 | -0.32 | 0.26 |
| MIN | 18.05 | 18.77 | 20.44 | 20.23 | 20.57 | 19.78 | -2.51 | -2.52 | -2.57 | -1.90 | -1.85 |
| AVERAGE | 18.82 | 19.64 | 20.53 | 20.40 | 20.64 | 19.88 | -1.71 | -1.58 | -1.81 | -1.06 | -0.82 |
| SD | 0.26 | 0.28 | 0.08 | 0.13 | 0.05 | 0.08 | 0.28 | 0.30 | 0.26 | 0.28 | 0.23 |
| ES_Max2 | 0.00 | 4.56 | 4.58 | 4.69 | 2.25 | 3.35 | | | | | |
| ES_Average2 | 0.00 | 6.45 | 5.97 | 6.86 | 4.00 | 3.10 | | | | | |

**Table X.** Statistical summary of N values in metres, between global geopotential models and DEC2007 versus GeoiDEC14. ES_Max and ES_Average is the result of Effect Size (ES) analysis

CAMBRIDGE JOURNALS
http://journals.cambridge.org

0.66m, 0.24m, and 1.05m for EGM96, AIUG-GRACE03s, EGM2008 and GRACE2014s, respectively. These data indicate that the differences obtained of around 1.5m by side should not be used in the different models, because the error of such may reach a maximum of 0.3m, but the values obtained in other places of the world are not so elevated, with the exception of the GRACE2014s geoid, with which our geoid accidentally presents minors differences.

The reason for the existence of a smaller difference, with respect to the DEC2007 experimental model, is because it was obtained using the same methodology but with less data, and lacked a vertical reference level (mean sea level) at this moment, which was subsequently obtained with rigorous precision. With respect to its closeness to GRACE 2014, this could be due to the high resolution of this model (200 degrees) which produces greater precision. The comparison shows a significant level of improvement in the accuracy of our model with respect to the global models and the previous experimental model in the area.

Also, a statistical analysis termed Effect Size (ES) (Ledesma et al. 2008) was carried out on the comparison made between the different models. The estimation of ES is considered a necessary complementary test of hypothesis between a model whose validity needs to be proved (M0), in this case our GeoiDEC14 model, and the reference models (M1), in this case the global models and model DEC2007. The maximum value (Max) of each one of the models, which would be the worse situation we could find, and the mean value (Average), which would be the most representative value in each model, were taken as study parameters. The models where the ES is minimum would be those that more closely approach our model pattern (M0) GeoiDEC14. For our case, the results indicate that the minimum values correspond to models GRACE2014 and DEC2007, again marking this separation between models, and confirming that they are the ones with the greater precision and resolution among those compared, and which would validate the hypothesis that the precise local geoid model, GeoiDEC14, is the most precise geoid model obtained to date for the area of Deception Island.

On the other hand, the comparison of the distribution of the N values in GeoDEC2014, shows that some of these anomalies coincide with hot-spots on the island, such as the minimum values shown in Fumaroles Bay and Whalers Bay, which are areas with the presence of fumaroles, or the maximum values found in the remains of a flow in Colatinas, Black Glacier or Murature Point. These anomalies may be due to the properties of the crust and the density of the ground in the area (Crescentini and Amoruso, 2007), as can appreciated in the geology of the island, which is shown in Fig. 2.

Finally, on Livingston Island, a new and more accurate orthometric height is provided for geodetic stations BEJC and BEJ1, and the tide gauge control station TOJO, and subsequently the geoid undulation (N) was obtained. The values are similar to the average value obtained on Deception Island. Livingston Island has no volcanic activity, offering very similar N values between 3 points, and therefore no anomaly. Although these three values do not allow a geoid to be determined in the area, they do serve to compare the values obtained in Deception Island, which, being similar, allow it to be inferred that there is a very similar crust structure and mass distribution in both islands.

For the present work, the possibility was also studied of applying other methodologies for the determination of the geoid, among them the Remove-Restore method, but the obtained results were not very satisfactory, being similar to those obtained by (Berrocoso et al. 2008), in addition, this method is difficult to apply in the area due to the lack of data, mainly a verified and precise Digital Terrain Model (DTM) or Digital Elevation Model (DEM), which is fundamental for the accuracy of the resulting model.

**Conclusions**

A precise geoid model is presented for Deception Island, derived by means of the direct GPS-levelling technique from a combination of the GPS, levelling and gravimetric data in order to obtain the geoid undulation with a greater precision than that obtained to date, with the different existing global models, or that obtained in the 2007 local experimental model, DEC2007.

The new precise local model, GeoiDEC14, through having greater precision, allows the orthometric heights to be determined directly and with such sufficient precision that it could be used in geophysical, topographic and oceanographic applications throughout our area of study, mainly in the interior area of the island, around Port Foster.

For the determination of the geoid of Deception Island, the gravity observations were made on the vertices of the REGRID network, which includes all the points of the REGID and RENID network, all given ITRF2000.0 coordinates and orthometric heights on the levelling points. To obtain the precise local geoid model, GPS/levelling/gravity methodology was used, with a total of 108 points on Deception Island, homogenously distributed in the interior part of the island, around Port Foster.

The results of the studies on the mean sea level obtained at the tide gauge stations of LIVMAR (Livingston Island) and DECMAR (Deception Island), which were the first vertical reference levels obtained on the basis of real mean sea level data taken "in situ" (Jigena et al. 2014), have been introduced in the new calculation and adjustments of the REGID, RENID and REGRID geodesic and gravimetric networks, and later in the calculation of the new precision geoid of Deception Island, GeoiDEC14. The introduction of these new data has provided a highly precise geoid model (maximum error of 0.2 m), and has noticeably improved on the precision previously obtained by similar models in the area (DEC2007), as well as on that of the global models. Comparing our experimental model with global geoid models, we see that the geopotential model GRACE2014 presents a best fit with respect to our model. Also, we observe that the results are improved compared to the experimental model obtained in 2007. In terms of comparing the level of adjustment of different geoid models, with that obtained in this work, we conclude that the GRACE2014 geopotential model shows good agreement with the experimental geoid GeoiDEC14, with a difference in the average values of 1.058 m, whereas with the other global models the difference is over 1.58 m. The best adjustment with GRACE14 is due to the high resolution of this geopotential model, and which is the last one made available to the scientific community and has GRACE data of more than 10 years for its determination, and also includes data on the atmosphere and the oceanic mass.

At Livingston Island we have obtained three geodesic stations, provided with geoid undulation (N), in addition to their corresponding geodetic data. These three values do not allow the determination of a geoid in the area, nevertheless they have served to compare the values obtained on Deception Island, with the conclusion that the mean geoid undulation (N) values are similar and do not show significant differences regarding the values obtained for the Deception Island model and which would validate our local geoid model, GeoiDEC14.

It must be pointed out that this experimental geoid, GeoiDEC14, should be improved by adding data from the outer area of the island, since the geoid height for this area was obtained by extrapolating the values taken near the inner bay, which implies greater error. In particular, marine gravimetric measurements should be added to this computation of the experimental geoid for the Deception volcano. To improve the assessment of the geoid at Deception Island, gravity data located on the outer border of the island and sea gravity data should be added in subsequent works. Also, it is advisable to carry out a new levelling survey in order to correct the altimetric reference framework errors defined in 2003, to redefine a new framework with an improved accuracy. Also, we have obtained new fundamental altimetric values for the reference benchmarks of the RENID network with regard to mean sea level (MSL), corrected for gravimetric effects. The possibility of adding Radar Altimeter data, for instantaneous sea level measures, should also be taken into account.

**Acknowledgments**

This work was made possible by the support of the following projects, funded by the Spanish Ministry of Science and Technology through the National Programme of Antarctic Research and Natural Resources REN2000-0551-C03-01/ANT, REN2002-1383/ANT, CGL2004-21547-E/ANT, CGL2007-28768-E/ANT, CTM2008-03113-E/ANT and CTM2009-07251/ANT, as well as the Research Group RNM314 "Geodesia y Geofísica Cádiz", pertaining to the Junta de Andalucía, Spain

The authors would also like to thank the crew of the Oceanographic Research Vessel "BIO Las Palmas" and the members of the Spanish Antarctic Stations "Gabriel de Castilla" and "Juan Carlos I" for their collaboration during the surveying campaigns. We also thank Dr. Jorge Gárate for comments and suggestions in the production of this paper.

The authors thank the editors and the two reviewers, Dr. Smellie and Dr. Zanutti for their comments which greatly improved the manuscript.

**Author contributions**

Research design: MBD, BJA, CTL and JVP.
Data collection (participating in the Spanish Antarctic campaigns since 1989 to 2013: MBD, BJA, CTL, JVP, AFR and IBG
Data processing and manuscript preparation: BJA, CTL, MBD, IBG and JVP.
Manuscript final edition: BJA, MBD, CTL, IBG and JVP

**References**

ALTAMIMI, Z., SILLARD P. & BOUCHER C. 2002. ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications. J. Geophys. Res., Vol. 107(B10), 2214, doi:10.1029/2001JB000561.

BAKER, P.E., MCREATH, I., HARVEY, M.R., ROOBOL, M.J. & DAVIES, T.G. 1975. The geology of the South Shetland Islands: V. Volcanic evolution of Deception Island. British Antarctic Survey Scientific Reports 78, pp 1-81.

BERROCOSO M., GÁRATE J., MARTÍN-DÁVILA J., FERNÁNDEZ-ROS A., MOREU G. & JIGENA B. 1996. Improving the local geoid with GPS. Reports of the Finnish Geodetic Institute, 96-2, pp 91-96, Masala.

BERROCOSO M., FERNÁNDEZ-ROS A., TORRECILLAS C., ENRÍQUEZ DE SALAMANCA J.M., RAMÍREZ M.E., PÉREZ-PEÑA A., GONZÁLEZ M.J., PÁEZ R., JIMÉNEZ-TEJA Y., GARCÍA-GARCÍA A., TÁRRAGA M. & GARCÍA-GARCÍA F. 2006. Geodetic Research on Deception Island, Antarctica. In Fütterer D.K., Damaske D., Kleinschmidt G., Miller, H. & Tessensohn F., Eds. Antarctica: Contributions to Global Earth Sciences. Chapter 7.7, pp. 391–396, Springer. Berlín.

BERROCOSO M., FERNÁNDEZ-ROS A., RAMÍREZ M.E., ENRÍQUEZ DE SALAMANCA J.M., TORRECILLAS C., PÉREZ-PEÑA A., PÁEZ R., GARCÍA-GARCÍA A., JIMÉNEZ-TEJA Y., GARCÍA-GARCÍA F., SOTO R., GÁRATE J., MARTÍN-DÁVILA J., SANCHEZ-ALZOLA A., DE GIL A., FERNÁNDEZ-PRADA J.A. & JIGENA B. 2008. Geodetic Research on Deception Island and its Environment (South Shetland Islands, Bransfield Sea and Antarctic Peninsula) during Spanish Antarctic Campaigns (1987–2007). In: CAPRA A., DIETRICH R., (Eds.) Geodetic and Geophysical Observations in Antarctica. Springer-Verlag, Berlin, pp 97–124.

BERROCOSO M., TORRECILLAS C., JIGENA B. AND FERNÁNDEZ-ROS A. 2012. Determination of geomorphological and volumetric variations in the 1970 land volcanic craters area (Deception Island, Antarctica) from 1968 using historical and current maps, remote sensing and GNSS. Antarctic Science / Volume 24 / Issue 04 / August 2012, pp 367 – 376.

BEUTLER G., BOCK H., BROCKMANN E. AND BERNESE WORKING GROUP 2001. Bernese Software Version 4.2. Hungentobler U., Schaer S. & Fridez P. (Eds.), Astronomical Institute, University of Berne.

BOUIN, M.N. & VIGNY, C. 2000. New constrains on Antarctic plate motion and deformation from GPS data, Journal Geophysical Research., 105, 28279-28293.

CARBÓ A., MUÑOZ-MARTÍN A., DÁVILA J., CATALÁN M. & GARCÍA A. 2001. Análisis de nuevos datos gravimétricos marinos en el entorno de la Isla Decepción (Islas Shetland del Sur, Antártida). Revista de la Sociedad Geológica de España, Vol. 14 (3-4), pp 189-197.

CGE, CENTRO GEOGRÁFICO EJÉRCITO ESPAÑOL 1992. Topographic map of Deception Island. 1:25 000. Madrid.

CRESCENTINI L. & AMORUSO A. 2007. Effects of crustal layering on the inversion of deformation and gravity data in volcanic areas: An application to the Campi Flegrei caldera, Italy. Geophysical Research Letters, Vol. 34, L09303, doi:10.1029/2007gl029919.

ESRI INC. 2008. ArcGIS Desktop 9.3 Help. ESRI, 380 New York Street, Redlands, CA 92373-8100, USA.

FECHER T., PAIL R. AND GRUBER T. 2015. Global gravity field modeling based on GOCE and complementary gravity data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 35 Elsevier B.V., pp. 120–127.

HEISKANEN W. A. & MORITZ H. 1985. Physical Geodesy. W. H. Freeman Eds., San Francisco, London. Traducción: Geodesia Física. (1985) IGN and Instituto de Astronomía y Geodesia UCM-CSIC, Madrid. 364 pp.

JIGENA B., VIDAL J. & BERROCOSO M. 2014. Determination of the mean sea level at Deception and Livingston islands, Antarctica. Antarctic Science / Volume 27 / Issue 01 / February 2015, pp 101 – 102.

LEDESMA R., MACBETH G. & CORTADA N. 2008. Tamaño del efecto: revisión teórica y aplicaciones con el sistema estadístico ViSta. Revista Latinoamericana de Psicología, volumen 40, No. 3, pp 425-439.

LEICK A. 2004. GPS Satellite Surveying. Third Edition. John Wiley & Sons Inc. (Eds.), New Jersey, USA. 366 pp.

LEMOINE F. G., KENYON S. C., FACTOR J. K., TRIMMER R. G., PAVLIS N. K., CHINN D. S., COX C. M., KLOSKO S. M., LUTHCKE S. B., TORRENCE M. H., WANG Y . M., WILLIAMSON R. G., PAVLIS E. C., RAPP R. H. & OLSON T. R. 1998. The development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96, NASA Technical Report NASA/TP-1996n8-206861.

MAESTRO, A., SOMOZA, L., BARNOLAS, A., REY, J., MARTÍNEZ-FRÍAS, J. & LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. 2007. Active tectonics, fault patterns and stress field of Deception Island: A response to oblique convergence between the Pacific and Antarctic Plates. Journal of South American Earth Sciences, 23, pp 253-268.

MARTÍN-FURONES, A. 2000. Análisis y ajuste de modelos de geoide. Observación y cálculo de la red gravimétrica de tercer orden en la Provincia de Valencia. Phd Thesis, Valencia (España). Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Noviembre 2000, 163 pp.

MARTÍ, J., VILA, J. & REY, J. 1996. Deception Island (Bransfield Strait, Antarctica); an example of a volcanic caldera developed by extensional tectonics. In: McGuire, W.J, Jones, A.P., Neuberg, J., (Eds). Volcano instability on the earth and other planets. London: Geological Society, London, Special Publications 110, pp 253-265.

MAYER-GUERR T., ZEHENTNER N., KLINGER B. AND KVAS A. 2014. The satellite-only gravity field model ITSG-GRACE2014s. Institute of Theoretical Geodesy and Satellite Geodesy, Graz University of Technology. Austria, http://itsg.tugraz.at/research/ITSG-Grace2014

PAIL R., GOIGINGER H., SCHUH W.- D. , HÖCK E., BROCKMANN J. M. ,FECHER T., GRUBER T., MAYER- GÜRR T.,KUSCHE J., JÄGGI A. & RIESER D. 2010. Combined satellite gravity field model GOCO01S derived from GOCE and GRACE. Geophysical Research letters, Vol. 37, L20314, American Geophysical Union, 0094-8276/10/2010GL044906, doi:10.1029/2010GL044906.

PAVLIS N.K, HOLMES S.A, KENYON S.C. & FACTOR J.K. 2012. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). Journal of Geophysical Research, Vol. 117, Volume 117, Issue B4, 19 APR 2012B04406.

PRATES G., BERROCOSO M., FERNÁNDEZ-ROS A. & GARCÍA A. 2013. Enhancement of sub-daily positioning solutions for surface deformation monitoring at Deception volcano (South Shetland Islands, Antarctica). Bull Volcanol, (2013). 75:688, DOI 10.1007/s00445-013-0688-3

REYES R. B., NAGAI M., KAMIYA Y., TIPDECHO T. & NINSAWAT S. 2015. Effect of sea level rise in the validation of geopotential/geoid models in Metro Manila, Philippines. Survey Review 342 (47), 211-219.

SMELLIE J.L. 2001. Lithostratigraphy and volcanic evolution of Deception Island, South Shetland Islands. Antarctic Science, 13 (2), pp 188–209.

SMELLIE, J.L. 2002. The 1969 subglacial eruption on Deception Island (Antarctica): events and processes during an eruption beneath a thin glacier and implications for volcanic hazards. In Smellie J.L. & Chapman M.G., (Eds.). Volcano-ice interaction on Earth and Mars. Geological Society of London, Special Publication, No. 202, pp 59–79.

SMELLIE J. L., J. LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. W. THOMSON, AND M. R. A. THOMSON (2002). Geology and geomorphology of Deception Island,., British Antarctic Survey, BAS GEOMAP Series, Sheets 6-A and 6-B, 1:25 000, supplementary text, Cambridge, 77 pp.

TORGE, W. 2001. Geodesy, Third Edition. Gruyter Eds. Berlin, NewYork, 2001. 368 pp.

TORRECILLAS C., BERROCOSO M. & GARCIA A. 2006. The Multidisciplinary Scientific Information Support System (SIMAC) for Deception Island, Antarctica. Contributions to Global Earth Sciences. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 397–402.

TORRECILLAS, C., BERROCOSO, M., PEREZ-LOPEZ, R. & TORRECILLAS, M.D. 2011. Determination of volumetric variations and coastal changes due to historical volcanic eruptions using historical maps and remote-sensing at Deception Island (West Antarctica). Journal of Geomorphology 136, 6–14.

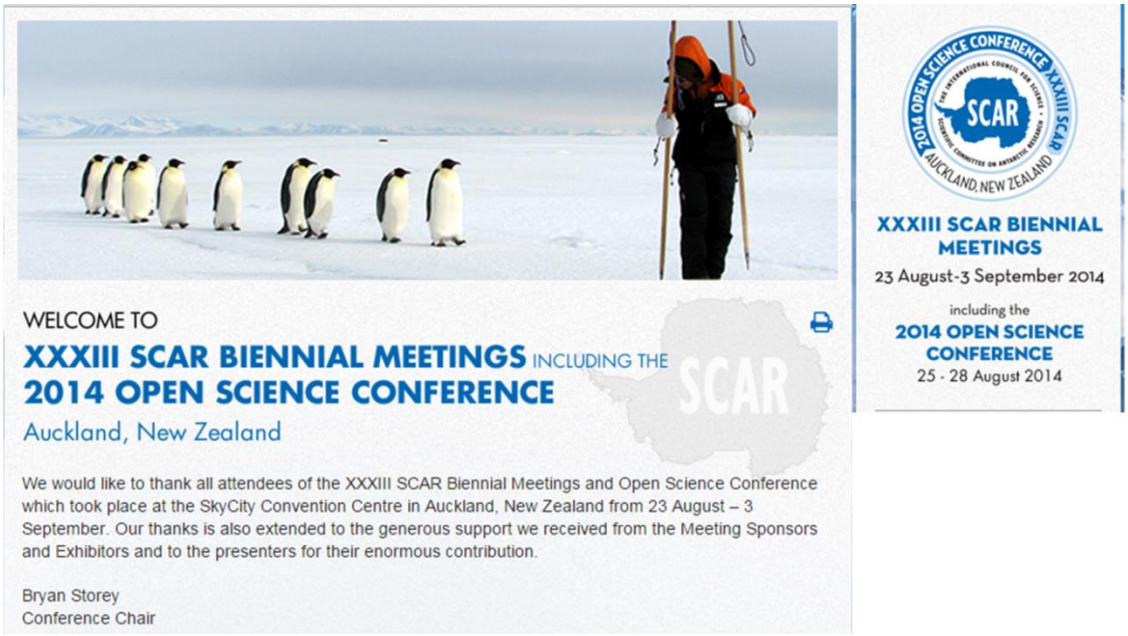
VALENCIO D. A., MENDÍA J. E. & VILAS J. F. 1979. Paleomagnetism and K-Ar age of Mesozoic and Cenozoic igneous rocks from Antarctica. Earth and Planetary Science Letters, 45, 61-68.

VIDAL J., BERROCOSO, M. & FERNÁNDEZ-ROS A. 2012. Study of tides and sea levels at Deception and Livingston islands, Antarctica. Antarctic Science 2 (24), pp 193– 201.

CAMBRIDGE JOURNALS
http://journals.cambridge.org

## 5.2. Participación en Congresos Internacionales

***SCAR 2014, Auckland, New Zealand***




### S30: OBSERVING ANTARCTICA AND THE SOUTHERN OCEAN

**Tidal gauge stations at Deception and Livingston Islands 2007-2014: records, analysis and georeference**

Berrocoso M., Jigena B., Vidal J.
*Universidad de Cádiz*

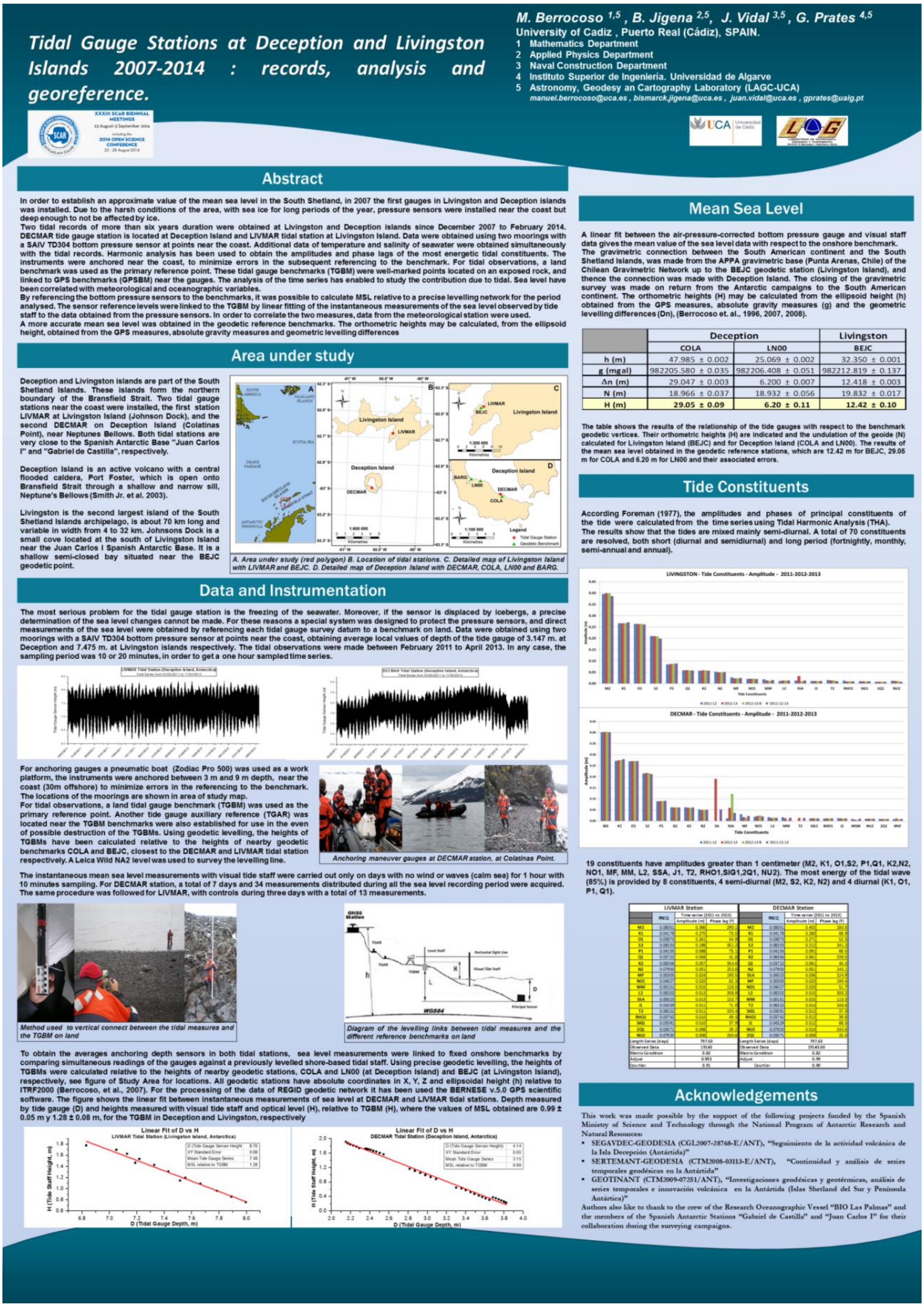
In order to establish an approximate value of the mean sea level in the South Shetland, in 2007 the first gauges in Livingston and Deception islands was installed. Due to the harsh conditions of the area, with sea ice for long periods of the year, pressure sensors were installed near the coast but deep enough to not be affected by ice.

Two tidal records of more than six years duration were obtained at Livingston and Deception islands since December 2007 to February 2014. DECMAR tide gauge station is located at Deception Island and LIVMAR tidal station at Livingston Island. Data were obtained using two moorings with a SAIV TD304 bottom pressure sensor at points near the coast. Additional data of temperature and salinity of seawater were obtained simultaneously with the tidal records.

Harmonic analysis has been used to obtain the amplitudes and phase lags of the most energetic tidal constituents. The instruments were anchored near the coast, to minimize errors in the subsequent referencing to the benchmark. For tidal observations, a land benchmark was used as the primary reference point. These tidal gauge benchmarks (TGBM) were well-marked points located on an exposed rock, and linked to GPS benchmarks (GPSBM) near the gauges. The analysis of the time series has enabled to study the contribution due to tidal. Sea level have been correlated with meteorological and oceanographic variables.

By referencing the bottom pressure sensors to the benchmarks, it was possible to calculate MSL relative to a precise levelling network for the period analysed. The sensor reference levels were linked to the TGBM by linear fitting of the instantaneous measurements of the sea level observed by tide staff to the data obtained from the pressure sensors. In order to correlate the two measures, data from the meteorological station were used.

A more accurate mean sea level was obtained in the geodetic reference benchmarks. The orthometric heights may be calculated, from the ellipsoid height, obtained from the GPS measures, absolute gravity measures and geometric levelling differences.


Tidal Gauge Stations at Deception and Livingston Islands 2007-2014 : records, analysis and georeference.
M. Berrocoso 1,5 , B. Jigena 2,5, J. Vidal 3,5 , G. Prates 4,5
University of Cadiz , Puerto Real (Cádiz), SPAIN.
1 Mathematics Department
2 Applied Physics Department
3 Naval Construction Department
4 Instituto Superior de Ingenieria. Universidad de Algarve
5 Astronomy, Geodesy an Cartography Laboratory (LAGC-UCA)
manuel.berrocoso@uca.es , bismarck.jigena@uca.es , juan.vidal@uca.es , gprates@ualg.pt
XXXIII SCAR BIENNIAL MEETINGS
2014 OPEN SCIENCE CONFERENCE
Abstract
In order to establish an approximate value of the mean sea level in the South Shetland, in 2007 the first gauges in Livingston and Deception islands was installed. Due to the harsh conditions of the area, with sea ice for long periods of the year, pressure sensors were installed near the coast but deep enough to not be affected by ice.
Two tidal records of more than six years duration were obtained at Livingston and Deception islands since December 2007 to February 2014. DECMAR tide gauge station is located at Deception Island and LIVMAR tidal station at Livingston Island. Data were obtained using two moorings with a SAIV TD304 bottom pressure sensor at points near the coast. Additional data of temperature and salinity of seawater were obtained simultaneously with the tidal records. Harmonic analysis has been used to obtain the amplitudes and phase lags of the most energetic tidal constituents. The instruments were anchored near the coast, to minimize errors in the subsequent referencing to the benchmark. For tidal observations, a land benchmark was used as the primary reference point. These tidal gauge benchmarks (TGBM) were well-marked points located on an exposed rock, and linked to GPS benchmarks (GPSBM) near the gauges. The analysis of the time series has enabled to study the contribution due to tidal. Sea level have been correlated with meteorological and oceanographic variables.
By referencing the bottom pressure sensors to the benchmarks, it was possible to calculate MSL relative to a precise levelling network for the period analysed. The sensor reference levels were linked to the TGBM by linear fitting of the instantaneous measurements of the sea level observed by tide staff to the data obtained from the pressure sensors. In order to correlate the two measures, data from the meteorological station were used.
A more accurate mean sea level was obtained in the geodetic reference benchmarks. The orthometric heights may be calculated, from the ellipsoid height, obtained from the GPS measures, absolute gravity measures and geometric levelling differences
Area under study
Deception and Livingston islands are part of the South Shetland Islands. These islands form the northern boundary of the Bransfield Strait. Two tidal gauge stations near the coast were installed, the first station LIVMAR at Livingston Island (Johnson Dock), and the second DECMAR on Deception Island (Colatinas Point), near Neptunes Bellows. Both tidal stations are very close to the Spanish Antarctic Base "Juan Carlos I" and "Gabriel de Castilla", respectively.
Deception Island is an active volcano with a central flooded caldera, Port Foster, which is open onto Bransfield Strait through a shallow and narrow sill, Neptune's Bellows (Smith Jr. et al. 2003).
Livingston is the second largest island of the South Shetland Islands archipelago, is about 70 km long and variable in width from 4 to 32 km. Johnsons Dock is a small cove located at the south of Livingston Island near the Juan Carlos I Spanish Antarctic Base. It is a shallow semi-closed bay situated near the BEJC geodetic point.
Livingston Island
LIVMAR
BEJC
Deception Island
DECMAR
BARG
LN00
COLA
Legend
Tidal Gauge Station
Geodetic Benchmark
A. Area under study (red polygon) B. Location of tidal stations. C. Detailed map of Livingston Island with LIVMAR and BEJC. D. Detailed map of Deception Island with DECMAR, COLA, LN00 and BARG.
Data and Instrumentation
The most serious problem for the tidal gauge station is the freezing of the seawater. Moreover, if the sensor is displaced by icebergs, a precise determination of the sea level changes cannot be made. For these reasons a special system was designed to protect the pressure sensors, and direct measurements of the sea level were obtained by referencing each tidal gauge survey datum to a benchmark on land. Data were obtained using two moorings with a SAIV TD304 bottom pressure sensor at points near the coast, obtaining average local values of depth of the tide gauge of 3.147 m. at Deception and 7.475 m. at Livingston islands respectively. The tidal observations were made between February 2011 to April 2013. In any case, the sampling period was 10 or 20 minutes, in order to get a one hour sampled time series.
For anchoring gauges a pneumatic boat (Zodiac Pro 500) was used as a work platform, the instruments were anchored between 3 m and 9 m depth, near the coast (30m offshore) to minimize errors in the referencing to the benchmark. The locations of the moorings are shown in area of study map.
For tidal observations, a land tidal gauge benchmark (TGBM) was used as the primary reference point. Another tide gauge auxiliary reference (TGAR) was located near the TGBM benchmarks were also established for use in the even of possible destruction of the TGBMs. Using geodetic levelling, the heights of TGBMs have been calculated relative to the heights of nearby geodetic benchmarks COLA and BEJC, closest to the DECMAR and LIVMAR tidal station respectively. A Leica Wild NA2 level was used to survey the levelling line.
Anchoring maneuver gauges at DECMAR station, at Colatinas Point.
The instantaneous mean sea level measurements with visual tide staff were carried out only on days with no wind or waves (calm sea) for 1 hour with 10 minutes sampling. For DECMAR station, a total of 7 days and 34 measurements distributed during all the sea level recording period were acquired. The same procedure was followed for LIVMAR, with controls during three days with a total of 13 measurements.
Method used to vertical connect between the tidal measures and the TGBM on land
GNSS Station
TGAR
TGBM
Level Staff
Horizontal Sight Line
Visual Tide Staff
h
H
L
D
WGS84
Principal Sensor
Diagram of the levelling links between tidal measures and the different reference benchmarks on land
To obtain the averages anchoring depth sensors in both tidal stations, sea level measurements were linked to fixed onshore benchmarks by comparing simultaneous readings of the gauges against a previously levelled shore-based tidal staff. Using precise geodetic levelling, the heights of TGBMs were calculated relative to the heights of nearby geodetic stations, COLA and LN00 (at Deception Island) and BEJC (at Livingston Island), respectively, see figure of Study Area for locations. All geodetic stations have absolute coordinates in X, Y, Z and ellipsoidal height (h) relative to ITRF2000 (Berrocoso, et al., 2007). For the processing of the data of REGID geodetic network it has been used the BERNESE v.5.0 GPS scientific software. The figure shows the linear fit between instantaneous measurements of sea level at DECMAR and LIVMAR tidal stations. Depth measured by tide gauge (D) and heights measured with visual tide staff and optical level (H), relative to TGBM (H), where the values of MSL obtained are 0.99 ± 0.05 m y 1.28 ± 0.08 m, for the TGBM in Deception and Livingston, respectively
Linear Fit of D vs H
LIVMAR Tidal Station (Livingston Island, Antarctica)
Linear Fit of D vs H
DECMAR Tidal Station (Deception Island, Antarctica)
H (Tide Staff Height, m)
D (Tidal Gauge Depth, m)
Mean Sea Level
A linear fit between the air-pressure-corrected bottom pressure gauge and visual staff data gives the mean value of the sea level data with respect to the onshore benchmark.
The gravimetric connection between the South American continent and the South Shetland Islands, was made from the APPA gravimetric base (Punta Arenas, Chile) of the Chilean Gravimetric Network up to the BEJC geodetic station (Livingston Island), and thence the connection was made with Deception Island. The closing of the gravimetric survey was made on return from the Antarctic campaigns to the South American continent. The orthometric heights (H) may be calculated from the ellipsoid height (h) obtained from the GPS measures, absolute gravity measures (g) and the geometric levelling differences (Dn), (Berrocoso et. al., 1996, 2007, 2008).
| | Deception | | Livingston |
| | COLA | LN00 | BEJC |
| h (m) | 47.985 ± 0.002 | 25.069 ± 0.002 | 32.350 ± 0.001 |
| g (mgal) | 982205.580 ± 0.035 | 982206.408 ± 0.051 | 982212.819 ± 0.137 |
| Δn (m) | 29.047 ± 0.003 | 6.200 ± 0.007 | 12.418 ± 0.003 |
| N (m) | 18.966 ± 0.037 | 18.932 ± 0.056 | 19.832 ± 0.017 |
| H (m) | 29.05 ± 0.09 | 6.20 ± 0.11 | 12.42 ± 0.10 |
The table shows the results of the relationship of the tide gauges with respect to the benchmark geodetic vertices. Their orthometric heights (H) are indicated and the undulation of the geoide (N) calculated for Livingston Island (BEJC) and for Deception Island (COLA and LN00). The results of the mean sea level obtained in the geodetic reference stations, which are 12.42 m for BEJC, 29.05 m for COLA and 6.20 m for LN00 and their associated errors.
Tide Constituents
According Foreman (1977), the amplitudes and phases of principal constituents of the tide were calculated from the time series using Tidal Harmonic Analysis (THA).
The results show that the tides are mixed mainly semi-diurnal. A total of 70 constituents are resolved, both short (diurnal and semidiurnal) and long period (fortnightly, monthly, semi-annual and annual).
LIVINGSTON - Tide Constituents - Amplitude - 2011-2012-2013
DECMAR - Tide Constituents - Amplitude - 2011-2012-2013
Tide Constituents
19 constituents have amplitudes greater than 1 centimeter (M2, K1, O1,S2, P1,Q1, K2,N2, NO1, MF, MM, L2, SSA, J1, T2, RHO1,SIG1,2Q1, NU2). The most energy of the tidal wave (85%) is provided by 8 constituents, 4 semi-diurnal (M2, S2, K2, N2) and 4 diurnal (K1, O1, P1, Q1).
LIVMAR Station
DECMAR Station
Acknowledgements
This work was made possible by the support of the following projects funded by the Spanish Ministry of Science and Technology through the National Program of Antarctic Research and Natural Resources:
• SEGAVDEC-GEODESIA (CGL2007-28768-E/ANT), "Seguimiento de la actividad volcánica de la Isla Decepción (Antártida)"
• SERTEMANT-GEODESIA (CTM2008-03113-E/ANT), "Continuidad y análisis de series temporales geodésicas en la Antártida"
• GEOTINANT (CTM2009-07251/ANT), "Investigaciones geodésicas y geotérmicas, análisis de series temporales e innovación volcánica en la Antártida (Islas Shetland del Sur y Península Antártica)"
Authors also like to thank to the crew of the Research Oceanographic Vessel "BIO Las Palmas" and the members of the Spanish Antarctic Stations "Gabriel de Castilla" and "Juan Carlos I" for their collaboration during the surveying campaigns.

***IUGG 2015, Prague, Czech Republic***

26th IUGG GENERAL ASSEMBLY 2015
INTERNATIONAL UNION OF GEODESY AND GEOPHYSICS
UNION GÉODÉSIQUE ET GÉOPHYSIQUE INTERNATIONALE

PRAGUE, CZECH REPUBLIC
PRAGUE CONGRESS CENTRE
JUNE 22 - JULY 2, 2015
Earth and Environmental Sciences for Future Generations

26th IUGG GENERAL ASSEMBLY
PRAGUE 2015

# ABSTRACTS

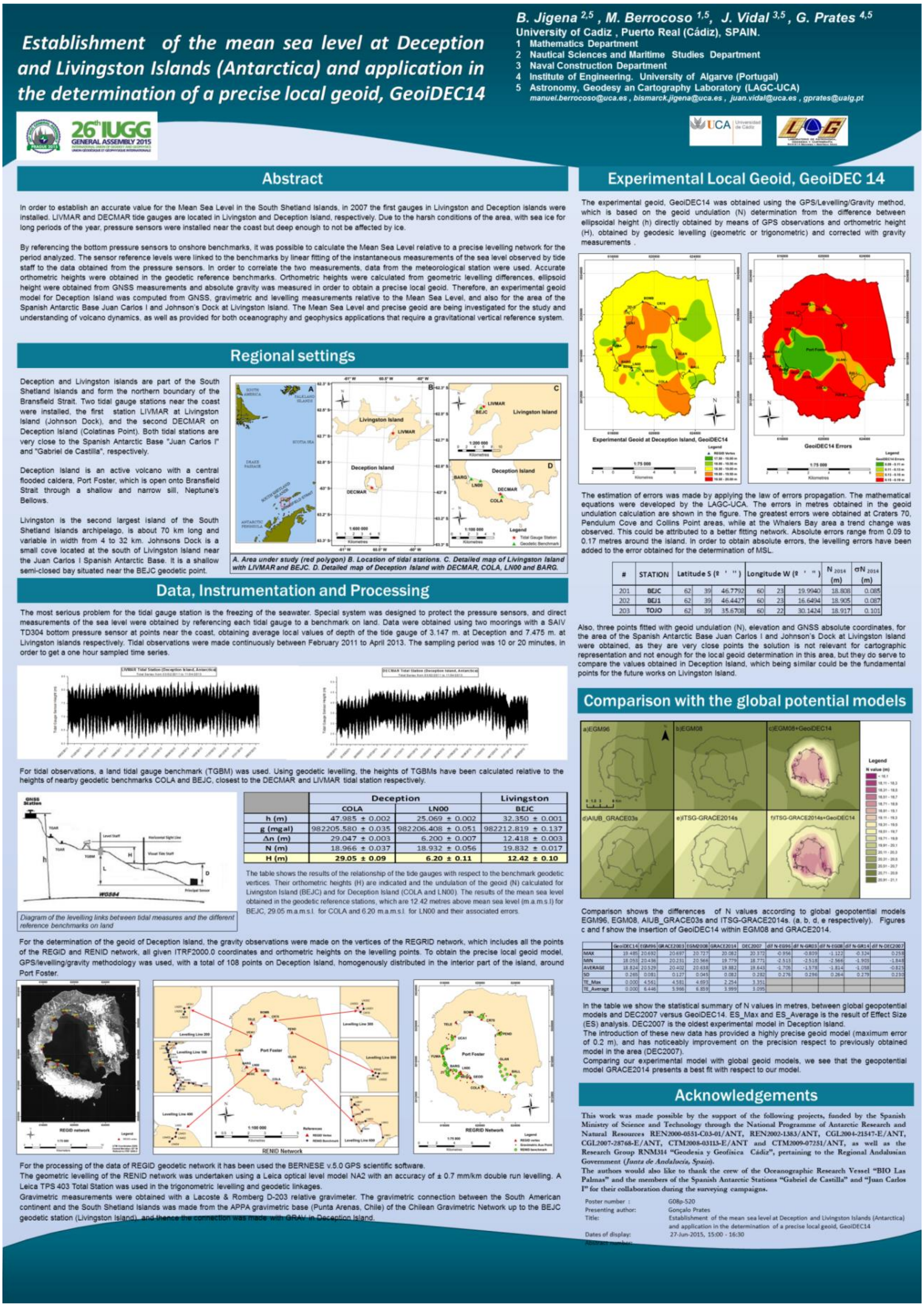
G08p-G08p G08 Sea-Level Observation and Modelling
Abstract: G08p-520

**Mean Sea Level determination in Deception and Livingston Islands (Antarctica) and its contribute to estimate a precise local geoid.**

*B. Jigena[1], M. Berrocoso[1], J. Vidal[1], G. Prates[2]*
1Universidad de Cádiz, Facultad de Ciencias, Cádiz, Spain
2Universidade do Algarve, Instituto Superior de Engenharia, Faro, Portugal

In order to establish an accurate value for the Mean Sea Level in the South Shetland Islands, in 2007 the first gauges in Livingston and Deception islands were installed. LIVMAR and DECMAR tide gauges are located in Livingston and Deception Island, respectively. Due to the harsh conditions of the area, with sea ice for long periods of the year, pressure sensors were installed near the coast but deep enough to not be affected by ice.

By referencing the bottom pressure sensors to on-shore benchmarks, it was possible to calculate the Mean Sea Level relative to a precise leveling network for the period analyzed. The sensor reference levels were linked to the benchmarks by linear fitting of the instantaneous measurements of the sea level observed by tide staff to the data obtained from the pressure sensors. In order to correlate the two measurements, data from the meteorological station were used. Accurate orthometric heights were obtained in the geodetic reference benchmarks. Orthometric heights were calculated from geometric leveling differences, ellipsoid height were obtained from GNSS measurements and absolute gravity was measured in order to obtain a precise local geoid. Therefore, an experimental geoid model for Deception Island was computed from GNSS, gravimetric and leveling measurements relative to the Mean Sea Level, and also for the area of the Spanish Antarctic Base Juan Carlos I and Johnson's Dock at Livingston Island. The Mean Sea Level and precise geoid are being investigated for the study and understanding of volcano dynamics, as well as provided for both oceanography and geophysics applications that require a gravitational vertical reference system.


Establishment of the mean sea level at Deception and Livingston Islands (Antarctica) and application in the determination of a precise local geoid, GeoiDEC14
B. Jigena 2,5 , M. Berrocoso 1,5, J. Vidal 3,5 , G. Prates 4,5
University of Cadiz , Puerto Real (Cádiz), SPAIN.
1 Mathematics Department
2 Nautical Sciences and Maritime Studies Department
3 Naval Construction Department
4 Institute of Engineering. University of Algarve (Portugal)
5 Astronomy, Geodesy an Cartography Laboratory (LAGC-UCA)
manuel.berrocoso@uca.es , bismarck.jigena@uca.es , juan.vidal@uca.es , gprates@ualg.pt
26th IUGG GENERAL ASSEMBLY 2015
Abstract
In order to establish an accurate value for the Mean Sea Level in the South Shetland Islands, in 2007 the first gauges in Livingston and Deception islands were installed. LIVMAR and DECMAR tide gauges are located in Livingston and Deception Island, respectively. Due to the harsh conditions of the area, with sea ice for long periods of the year, pressure sensors were installed near the coast but deep enough to not be affected by ice.
By referencing the bottom pressure sensors to onshore benchmarks, it was possible to calculate the Mean Sea Level relative to a precise levelling network for the period analyzed. The sensor reference levels were linked to the benchmarks by linear fitting of the instantaneous measurements of the sea level observed by tide staff to the data obtained from the pressure sensors. In order to correlate the two measurements, data from the meteorological station were used. Accurate orthometric heights were obtained in the geodetic reference benchmarks. Orthometric heights were calculated from geometric levelling differences, ellipsoid height were obtained from GNSS measurements and absolute gravity was measured in order to obtain a precise local geoid. Therefore, an experimental geoid model for Deception Island was computed from GNSS, gravimetric and levelling measurements relative to the Mean Sea Level, and also for the area of the Spanish Antarctic Base Juan Carlos I and Johnson's Dock at Livingston Island. The Mean Sea Level and precise geoid are being investigated for the study and understanding of volcano dynamics, as well as provided for both oceanography and geophysics applications that require a gravitational vertical reference system.
Regional settings
Deception and Livingston islands are part of the South Shetland Islands and form the northern boundary of the Bransfield Strait. Two tidal gauge stations near the coast were installed, the first station LIVMAR at Livingston Island (Johnson Dock), and the second DECMAR on Deception Island (Colatinas Point). Both tidal stations are very close to the Spanish Antarctic Base "Juan Carlos I" and "Gabriel de Castilla", respectively.
Deception Island is an active volcano with a central flooded caldera, Port Foster, which is open onto Bransfield Strait through a shallow and narrow sill, Neptune's Bellows.
Livingston is the second largest island of the South Shetland Islands archipelago, is about 70 km long and variable in width from 4 to 32 km. Johnsons Dock is a small cove located at the south of Livingston Island near the Juan Carlos I Spanish Antarctic Base. It is a shallow semi-closed bay situated near the BEJC geodetic point.
A. Area under study (red polygon) B. Location of tidal stations. C. Detailed map of Livingston Island with LIVMAR and BEJC. D. Detailed map of Deception Island with DECMAR, COLA, LN00 and BARG.
Data, Instrumentation and Processing
The most serious problem for the tidal gauge station is the freezing of the seawater. Special system was designed to protect the pressure sensors, and direct measurements of the sea level were obtained by referencing each tidal gauge to a benchmark on land. Data were obtained using two moorings with a SAIV TD304 bottom pressure sensor at points near the coast, obtaining average local values of depth of the tide gauge of 3.147 m. at Deception and 7.475 m. at Livingston islands respectively. Tidal observations were made continuously between February 2011 to April 2013. The sampling period was 10 or 20 minutes, in order to get a one hour sampled time series.
For tidal observations, a land tidal gauge benchmark (TGBM) was used. Using geodetic levelling, the heights of TGBMs have been calculated relative to the heights of nearby geodetic benchmarks COLA and BEJC, closest to the DECMAR and LIVMAR tidal station respectively.
Diagram of the levelling links between tidal measures and the different reference benchmarks on land
Deception: COLA, LN00 | Livingston: BEJC
h (m) 47.985 ± 0.002 | 25.069 ± 0.002 | 32.350 ± 0.001
g (mgal) 982205.580 ± 0.035 | 982206.408 ± 0.051 | 982212.819 ± 0.137
Δn (m) 29.047 ± 0.003 | 6.200 ± 0.007 | 12.418 ± 0.003
N (m) 18.966 ± 0.037 | 18.932 ± 0.056 | 19.832 ± 0.017
H (m) 29.05 ± 0.09 | 6.20 ± 0.11 | 12.42 ± 0.10
The table shows the results of the relationship of the tide gauges with respect to the benchmark geodetic vertices. Their orthometric heights (H) are indicated and the undulation of the geoid (N) calculated for Livingston Island (BEJC) and for Deception Island (COLA and LN00). The results of the mean sea level obtained in the geodetic reference stations, which are 12.42 metres above mean sea level (m.a.m.s.l) for BEJC, 29.05 m.a.m.s.l. for COLA and 6.20 m.a.m.s.l. for LN00 and their associated errors.
For the determination of the geoid of Deception Island, the gravity observations were made on the vertices of the REGRID network, which includes all the points of the REGID and RENID network, all given ITRF2000.0 coordinates and orthometric heights on the levelling points. To obtain the precise local geoid model, GPS/levelling/gravity methodology was used, with a total of 108 points on Deception Island, homogenously distributed in the interior part of the island, around Port Foster.
REGID network
RENID Network
REGRID Network
For the processing of the data of REGID geodetic network it has been used the BERNESE v.5.0 GPS scientific software.
The geometric levelling of the RENID network was undertaken using a Leica optical level model NA2 with an accuracy of ± 0.7 mm/km double run levelling. A Leica TPS 403 Total Station was used in the trigonometric levelling and geodetic linkages.
Gravimetric measurements were obtained with a Lacoste & Romberg D-203 relative gravimeter. The gravimetric connection between the South American continent and the South Shetland Islands was made from the APPA gravimetric base (Punta Arenas, Chile) of the Chilean Gravimetric Network up to the BEJC geodetic station (Livingston Island), and thence the connection was made with GRAV in Deception Island.
Experimental Local Geoid, GeoiDEC 14
The experimental geoid, GeoiDEC14 was obtained using the GPS/Levelling/Gravity method, which is based on the geoid undulation (N) determination from the difference between ellipsoidal height (h) directly obtained by means of GPS observations and orthometric height (H), obtained by geodesic levelling (geometric or trigonometric) and corrected with gravity measurements .
Experimental Geoid at Deception Island, GeoiDEC14
GeoiDEC14 Errors
The estimation of errors was made by applying the law of errors propagation. The mathematical equations were developed by the LAGC-UCA. The errors in metres obtained in the geoid undulation calculation are shown in the figure. The greatest errors were obtained at Craters 70, Pendulum Cove and Collins Point areas, while at the Whalers Bay area a trend change was observed. This could be attributed to a better fitting network. Absolute errors range from 0.09 to 0.17 metres around the island. In order to obtain absolute errors, the levelling errors have been added to the error obtained for the determination of MSL.
# | STATION | Latitude S (º ' ") | Longitude W (º ' ") | N 2014 (m) | σN 2014 (m)
201 | BEJC | 62 39 46.7792 | 60 23 19.9940 | 18.808 | 0.085
202 | BEJ1 | 62 39 46.4427 | 60 23 16.6494 | 18.905 | 0.087
203 | TOJO | 62 39 35.6708 | 60 22 30.1424 | 18.917 | 0.101
Also, three points fitted with geoid undulation (N), elevation and GNSS absolute coordinates, for the area of the Spanish Antarctic Base Juan Carlos I and Johnson's Dock at Livingston Island were obtained, as they are very close points the solution is not relevant for cartographic representation and not enough for the local geoid determination in this area, but they do serve to compare the values obtained in Deception Island, which being similar could be the fundamental points for the future works on Livingston Island.
Comparison with the global potential models
a)EGM96
b)EGM08
c)EGM08+GeoiDEC14
d)AIUB_GRACE03s
e)ITSG-GRACE2014s
f)ITSG-GRACE2014s+GeoiDEC14
Legend
Comparison shows the differences of N values according to global geopotential models EGM96, EGM08, AIUB_GRACE03s and ITSG-GRACE2014s. (a, b, d, e respectively). Figures c and f show the insertion of GeoiDEC14 within EGM08 and GRACE2014.
In the table we show the statistical summary of N values in metres, between global geopotential models and DEC2007 versus GeoiDEC14. ES_Max and ES_Average is the result of Effect Size (ES) analysis. DEC2007 is the oldest experimental model in Deception Island.
The introduction of these new data has provided a highly precise geoid model (maximum error of 0.2 m), and has noticeably improvement on the precision respect to previously obtained model in the area (DEC2007).
Comparing our experimental model with global geoid models, we see that the geopotential model GRACE2014 presents a best fit with respect to our model.
Acknowledgements
This work was made possible by the support of the following projects, funded by the Spanish Ministry of Science and Technology through the National Programme of Antarctic Research and Natural Resources REN2000-0551-C03-01/ANT, REN2002-1383/ANT, CGL2004-21547-E/ANT, CGL2007-28768-E/ANT, CTM2008-03113-E/ANT and CTM2009-07251/ANT, as well as the Research Group RNM314 "Geodesia y Geofísica Cádiz", pertaining to the Regional Andalusian Government (Junta de Andalucía, Spain).
The authors would also like to thank the crew of the Oceanographic Research Vessel "BIO Las Palmas" and the members of the Spanish Antarctic Stations "Gabriel de Castilla" and "Juan Carlos I" for their collaboration during the surveying campaigns.
Poster number : G08p-520
Presenting author: Gonçalo Prates
Title: Establishment of the mean sea level at Deception and Livingston Islands (Antarctica) and application in the determination of a precise local geoid, GeoiDEC14
Dates of display: 27-Jun-2015, 15:00 - 16:30

## Capítulo 6

# Conclusiones

### 6.1. Conclusiones

Las islas Shetland del Sur y específicamente las islas Livingston y Decepción, cuentan con muy pocos datos de mareas con más de tres meses de observación, debido a sus condiciones extremas y entorno bastante complejo, que dificultan la realización de levantamientos de campo y toma de datos en el terreno; por esta razón, las observaciones "in situ" de datos geodésicos, geofísicos, oceanográficos y específicamente los datos de marea, obtenidos por métodos directos y con series temporales de más de un año, constituyen una fuente muy valiosa de información para diferentes aplicaciones de ciencias e ingeniería, que hacen uso del nivel medio del mar como plano de referencia vertical.

Con la finalidad de adquirir los datos de marea de forma metódica y cumpliendo con todas las especificaciones técnicas para trabajos oceanográficos y geodésicos se instalaron las primeras estaciones de marea en las islas Livingston y Decepción, denominadas LIVMAR y DECMAR, respectivamente Estas estaciones fueron referenciadas, en vertical y horizontalmente a las redes geodésicas establecidas en la Antártida, a fin de tener vinculados los niveles del a un marco de referencia geodésico y tener un control riguroso de sus variaciones temporales y espaciales.

Un problema muy importante en los trabajos de marea realizados anteriormente en la zona, es la falta de registros de marea referenciados altimétricamente a puntos de control vertical permanentes. Por esta razón, uno de los primeros trabajos de campo necesario para esta investigación ha sido el establecimiento y monumentación de los puntos geodésicos de control de mareógrafos (TGBM) y las marcas auxiliares de referencia de nivel (TGAR). Los TGBM y TGAR, quedaron establecidos como *datums* o marcas de referencia principal, tanto para la referencia vertical como horizontal de las estaciones mareográficas. Los TGBM fueron vinculados a las redes geodésicas de control vertical y horizontal establecidas en la Antártida.

Entre febrero de 2011 y abril de 2013 se han obtenido nuevas observaciones de marea en las islas Livingston y Decepción, logrando una serie temporal con 798 días completos de observación, que constituyen una fuente muy valiosa de información para la determinación del nivel medio del mar en la zona y que contribuirá a mejorar los resultados de estudios e investigaciones científicas en la zona, en las diferentes aplicaciones que hacen uso del nivel medio del mar como plano de referencia vertical.

A partir de estos nuevos datos y habiendo introducido un nuevo cálculo y ajustes de las redes geodésicas y gravimétricos ( REGID, RENID y REGRID) se ha realizado la determinación del nivel medio del mar en las islas Livingston y Decepción En esta tesis presentamos los resultados de este nuevo cálculo y ajuste con la determinación de los niveles del mar en ambas islas, contando con nuevos datos, realizando nuevos ajustes en las redes existentes y referenciando todos los resultados a los vértices geodésicos de la red REGID y RGAE. Posteriormente se ha realizado el cálculo y determinación del nuevo geoide de precisión de la Isla Decepción, GeoiDEC14.

El nivel medio del mar (NMM) es el plano de referencia vertical fundamental de obligada utilización en aplicaciones técnicas y científicas, como las geodésicas, geofísicas y oceanográficas y todas aquellas donde se requiera la referenciación altimétrica. Para su obtención y determinación es necesario un estudio de marea completo y detallado. Durante el presente trabajo uno de los objetivos principales ha sido la adquisición, estudio y tratamiento de datos de marea de al menos un año de duración de tal manera de que podamos contar con el ciclo anual de mareas completo y presentar un estudio detallado de las constituyentes de marea en las islas Livingston y Decepción (Antártida) y a partir del mismo, establecer un valor preciso del nivel medio del mar en las islas.

Los cálculos de las constantes armónicas se realizaron a partir de series de marea de largo período, con 798 días de observación, aplicando el método de análisis armónico por mínimos cuadrados (Foreman 1977), para obtener las amplitudes y retardos de fase de las componentes de marea más representativas o de mayor energía. El análisis de la serie temporal ha permitido estudiar la contribución debida a las mareas. Los resultados obtenidos mejoran trabajos previos en la región, habiéndose obtenido 70 constituyentes de marea en ambas estaciones, de las cuales, las 19 primeras son las más representativas con amplitudes superiores a 1 cm y con un aporte del 93% de la energía total de la onda. En ambas estaciones se confirma que la marea tiene un régimen mixto de comportamiento semidiurno.

Para este trabajo también se obtuvieron datos adicionales de temperatura y salinidad del agua de mar, presión atmosférica y dirección y velocidad del viento simultáneamente con los registros de marea. Estos datos fueron utilizados en la corrección de los registros de marea por efectos meteorológicos, para realizar posteriormente una correlación del nivel del mar con las variables meteorológicas y oceanográficas. Para la obtención de estos datos se han utilizado las estaciones meteorológicas establecidas por la AEmet (Agencia Estatal de Meteorología) instaladas en las islas Livingston y Decepción.

Se presenta un modelo de geoide experimental y preciso para isla Decepción, que ha sido obtenido mediante el método directa GPS-Nivelación-Gravedad, combinando datos de GPS, de nivelación y gravimetría con el fin de obtener la ondulación del geoide con la mayor precisión posible y que ha hecho posible contar con un modelo de geoide cuya precisión es superior a la

de cualquier modelos global existentes e inclusive a modelos experimentales obtenidos anteriormente, como es el modelo experimental local DEC2007.

El nuevo modelo local preciso, GeoiDEC14, al tener una mayor precisión, combinado con el GPS, permite determinar las alturas ortométricas directamente y con la precisión suficiente para ser utilizado en aplicaciones de geofísica, topográfica y oceanográficas en toda el área de estudio, principalmente en la zona interior de la isla Decepción, alrededor de Puerto Foster.

Para la determinación del geoide de la isla Decepción, las observaciones de gravedad se hicieron en todos los puntos de la red REGRID, que incluye 12 vértices de la red REGID, 50 marcas de nivelación de la red RENID y 46 puntos auxiliares de gravimetría, siendo un total de 108 puntos distribuidos homogéneamente en la parte interior de la isla, alrededor de Puerto Foster. Todos estos puntos están dotados con coordenadas ITRF2000.0, alturas ortométricas y cota de nivelación.

La introducción de estos nuevos datos ha proporcionado un modelo de geoide de alta precisión (error máximo de 0,2 m), mejorando notablemente la precisión obtenida anteriormente con modelos similares en el área (DEC2007), así como las precisiones de los modelos geopotenciales globales.

Al comparar nuestro modelo experimental con los modelos globales del geoide, vemos que el modelo geopotencial GRACE2014 presenta un mejor ajuste con respecto a nuestro modelo, puesto que presenta una diferencia en los valores promedio de 1,058 m, mientras que con los otros modelos globales la diferencia es superior a 1,58 m. Podemos inferir que el mejor ajuste que presenta el modelo GRACE14 se debe a la alta resolución de este modelo geopotencial, que incluye datos GRACE de más de 10 años, además de datos de atmosféricos y de masa oceánica.

En isla Livingston hemos establecido tres estaciones geodésicas, provistos de ondulación del geoide (N), además de sus correspondientes datos geodésicos. Estos tres valores no permiten la determinación de un geoide en el área, sin embargo han servido para comparar sus valores con los obtenidos en isla Decepción. Los resultados de ondulación del geoide (N) obtenidos en Livingston y son similares y no muestran diferencias significativas, esto nos indica que la variaciones de la corteza terrestre y la distribución de masas en ambas no tiene diferencias significativas y en principio es un criterio para validar nuestro modelo de geoide local GeoiDEC14.

Para comprobar la validez de nuestro modelo, hemos realizado una comparación del GeoiDEC14 frente a los modelos globales vigentes y con cobertura en nuestra área de estudio, tales como los modelos EGM96, EGM2008, GRACE03 y GRACE2014. Los resultados de la comparación siempre muestran valores negativos, puesto que el valor promedio es de 18,8 m para nuestro modelo GeoiDEC14, frente a los valores promedio de entre 19,8 a 20,6 m para los

modelos globales. Esta diferencia se debe a la poca resolución de los modelos globales y por otro lado, también al cambio de densidad en la corteza terrestre en isla Decepción, debido a la actividad volcánica en la isla, que podría estar vinculada a la presencia de anomalías de la gravedad que influyen en la definición del geoide. Los valores de ondulación del geoide en Livingston reafirman la falta de detalle en los modelos de geoide global en la zona, presentando en el caso de los valores experimentales obtenidos un promedio de 18.9 metros, muy similar al promedio obtenido con el GeoiDEC14 para isla Decepción.

Al combinar la superficie de nivel medio del mar y un geoide local de precisión nos proporciona resultados muy interesantes para el estudio y análisis de la dinámica volcánica, además de ser una herramienta muy valiosa de apoyo en aplicaciones de oceanografía y geofísica y otras ciencias y técnicas que utilicen el nivel medio del mar como sistema de referencia vertical.

Es importante señalar que este geoide experimental, GeoiDEC14, puede mejorarse en el futuro, mediante la adición de datos de la zona exterior de la isla, ya que la altura ondulación del geoide en la parte externa de la isla se obtuvo por extrapolación, tomando los valores de los puntos ubicados en la bahía interior, lo que implica una mayor error en la parte exterior de la isla. También sería de mucha ayuda añadir medidas gravimétricas marinas tanto en el interior de Puerto Foster como en la zona del estrecho de Bransfield entre las islas Livingston y Decepción.

Es aconsejable que en trabajos futuros se realice un nuevo levantamiento altimétrico, con la finalidad de corregir los errores de marco de referencia altimétrico definido en 2003 y redefinir un nuevo marco de referencia con las nuevas precisiones alcanzadas.

Considerando, que hemos obtenido nuevos valores altimétricos en los puntos de referencia de la redes REGID y RENID respecto al nuevo plano de referencia vertical (NMM), es conveniente completar este estudio con datos satélite de radar altímetro de radar de las medidas instantáneas del nivel del mar.

# Bibliografía


Agudo L. M. (2003). Estudio sísmico de la isla Decepción (Antártida). Trabajo de investigación para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados en Geología Dinámica y Ambiental. Universidad Complutense de Madrid, 122 pp.

Altamimi, Z., Sillard P. & Boucher C. (2002). ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications. J. Geophys. Res., Vol. 107(B10), 2214, doi:10.1029/2001JB000561.

Álvarez, O., Tejedor B., Tejedor L., Kagan B.A. (2003).A note on sea-breeze-induced seasonal variability in the K1 tidal constants in Cádiz Bay, Spain. Estuarine Coastal and Shelf Science 58, pp. 805-812, Elsevier Ltd., 2003. http://doi:10.1016/S0272-7714(03)00186-0

Baker, P.E., Mc Reath, I., Harvey, M.R., Roobol, M.J. & Davies, T.G. (1975). The geology of the South Shetland Islands: V. Volcanic evolution of Deception Island. British Antarctic Survey Scientific Reports 78, pp 1-81.

Barker P.F., Burrell J. (1977). The opening of Drake Passage: Marine Geology, Vol 25(1-3), pp 15–34. doi:10.1016/0025-3227(77)90045-7.

Barker P. F. (1982). The Cenozoic subduction history of the Pacific margin of the Antarctic Peninsula: ridge crest-trench interaction. Journal of Geological Society, London, Vol 139 (6), pp 787-801.

Barker, P.F.; Dalziel, I.W.D., Storey, B.C. (1991). Tectonic development of the Scotia Arc Region. The Geology of Antarctica (Tingey, R.J.; editor) Oxford University Press: 215–248.

Barker, P.F. (2001). Scotia Sea regional tectonic evolution: implications for mantle flow and paleocirculation. Earth-Science Reviews 55: 1–39.

Baraldo A. (1999). Evolución geológica de la Isla Decepción, Islas Shetland del Sur, Antártida, Thesis Phd, 213 pp. Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.

Baraldo A. & Rinaldi C.A. (2000). Stratigraphy and structure of Deception Island, South Shetland Island, Antarctica, J. South American Earth Sci., 13, 785–796.

Baraldo A., Rapalini A.E., Böhnel H., Mena M. (2003). Paleomagnetic study of Deception Island, South Shetland Islands, Antarctica. Geophysical Journal International, Vol 153 (2), pp 333-343. doi: 10.1046/j.1365-246X.2003.01881.x

Berrocoso M., Gárate J., Martín-Dávila J., Fernández-Ros A., Moreu G. & Jigena B. (1996). Improving the local geoid with GPS. Reports of the Finnish Geodetic Institute, 96-2, pp 91-96, Masala.

Berrocoso M.,Ramírez M.E., Fernández-Ros A., (2005). Horizontal Deformation Models for Deception Island (South Shetland Islands, Antarctica), In: International Association International Association of Geodesy Symposia, Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles, F. Sansò and A.J. Gil (Eds.), IAG Symposium, pp 217-221, Jaén, Spain, March 17-19.

Berrocoso M., Fernández-Ros A., Torrecillas C., Enriquez-Salamanca J.M., Ramírez M.E., Pérez-Peña A., González-Fuentes M.J., Páez R., Jiménez-Teja Y., García-García A., Tárraga M. & García-García F., (2006a). Geodetic Research on Deception Island, Antarctica. In Fütterer D.K., Damaske D., Kleinschmidt G., Miller H. & Tessensohn F., Eds. Antarctica: Contributions to Global Earth Sciences. Berlín. Springer, Chapter 7.7, pp. 391–396.

Berrocoso M., Jiménez Teja Y., Páez R. (2006b). Determination of a physical reference frame for Deception Island. Geophysical Research Abstracts.

Berrocoso M., Ramírez, M.E., Fernández-Ros, A., Torrecillas, C., Enríquez-Salamanca, J.M., Pérez-Peña, A., Páez, R., Jiménez-Teja, Y., González-Fuentes, M.J.,Sánchez-Alzola, A., García-García, A., Tárraga, M., García-García, F., (2006c). Diseño, desarrollo, objetivos y estado actual de las redes geodésicas establecidas en la Antártida durante las campañas antárticas españolas. VII Simposio de Estudios Polares, Granada, Spain.

Berrocoso, M., Salamanca J.M., Ramírez, M.E., Fernández-Ros, A., Jigena, B. (2007). Determination of a local geoid for Deception Island, in Antarctica: A keystone in a Changing World, Online Proceedings of the 10th ISAES X, edited by A. K. Cooper and C.R. Raymond et al.., USGS Open-File Report 2007-2007-1047, Extended Abstract 123, 5 p., Poster Sesion 145, 10.3133/of2007-1047, 141 pp.

Berrocoso M., Fernández-Ros A., Ramírez M.E., Enríquez de Salamanca J.M., Torrecillas C., Pérez-Peña A., Páez R., García-García A., Jiménez-Teja Y., García-García F., Soto R., Gárate J., Martín-Dávila J., Sanchez-Alzola A., De Gil A., Fernández-Prada J.A. & Jigena B. (2008). Geodetic Research on Deception Island and its Environment (South Shetland Islands, Bransfield Sea and Antarctic Peninsula) during Spanish Antarctic Campaigns (1987–2007). In: CAPRA A., DIETRICH R., (Eds.) Geodetic and Geophysical Observations in Antarctica. Springer-Verlag, Berlin, pp 97–124.

Berrocoso M., Torrecillas C., Jigena B. and Fernández-Ros A. (2012). Determination of geomorphological and volumetric variations in the 1970 land volcanic craters area (Deception Island, Antarctica) from 1968 using historical and current maps, remote sensing and GNSS. Antarctic Science, Volume 24 (04), pp 367–376. DOI: http://dx.doi.org/10.1017/S0954102012000193

Beutler G., Bock H., Brockmann E. and Bernese Working Group (2001). Bernese Software Version 4.2. Hungentobler U., Schaer S. & Fridez P. (Eds.), Astronomical Institute, University of Berne.

Boedecker G., Ritcher B. (1981): The new gravity base net 1976 of the Federal Republic of Germany (DSGN 76). Bulletin Géodésique, nº 55, pp 250-266.

Bouin, M.N. & Vigny, C. (2000). New constrains on Antarctic plate motion and deformation from GPS data, Journal Geophysical Research., 105, 28279-28293.

Camacho, A. G. and Vieira, R. (1990): «Predicción de la corrección de marea en la Peninsula Iberica», Física de la Tierra, 2, 87-110.

Canals M., Gracia E. and Gebra Group (1997). Evidence of initial seafloor spreading in the Central Bransfield Basin, Western Antarctica. Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat., 93, pp 53–61.

Carbó A., Muñoz-Martín A., Dávila J., Catalán M. & García A. (2001). Análisis de nuevos datos gravimétricos marinos en el entorno de la Isla Decepción (Islas Shetland del Sur, Antártida). Revista de la Sociedad Geológica de España, Vol. 14 (3-4), pp 189-197.

CGE, Centro Geográfico del Ejercito Español (1992). Topographic map of Deception Island. 1:25 000. Madrid.

Crescentini L. & Amoruso A. (2007). Effects of crustal layering on the inversion of deformation and gravity data in volcanic areas: An application to the Campi Flegrei caldera, Italy. Geophysical Research Letters, Vol. 34, L09303, doi:10.1029/2007gl029919.

Chelton D.B. and Enfield. (1986). Ocean signals in tide gauge records. Journal of Geophysical Research, 91, 9081–9098.

Dalziel, I.W.D. (1984). Tectonic evolution of a fore-arc terrane, southern Scotia Ridge, Antarctica. Geological Society of America Special Paper 200, 32 pp.

Defant A., (1961). Physical oceanography, vol. 2. New York: Pergamon Press, pp. 598.

D'onofrio E.E., Dragani W.C., Speroni J.O. and Fiore M.E. (2003). Propagation and amplification of tide at the north-eastern coast of the Antarctic Peninsula. An observational study. Polar Geoscience, 16, 53–60.

Dragani W.C., Drabble M.R., D'onofrio E.E. and Mazio C.A. (2004). Propagation and amplification of tide at Bransfield and Gerlache straits, northwestern Antarctic Peninsula. An observational study. Polar Geosciences, 17, 156–170.

Dziewonsky A.M. & Woodhouse J.H. (1983). An experiment in the systematic study of global seismicity: centroid moment tensor solutions for 201 moderate and large earthquakes of 1981. Journal of Geophysical Research, Vol 88, pp 3247-3271.

ESRI INC. (2008). ArcGIS Desktop 9.3 Help. ESRI, 380 New York Street, Redlands, CA 92373-8100, USA.

Fecher T., Pail R. and Gruber T. (2015). Global gravity field modeling based on GOCE and complementary gravity data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 35 Elsevier B.V., pp. 120–127.

Fernández-Ros A. (2006). Modelización de movimientos y deformaciones de la corteza terrestre mediante observaciones de los satélites del Sistema de Posicionamiento Global. Thesis Phd, Departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz.

Fofonoff N.P. and Millard.(1983). Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. UNESCO Technical Papers in Marine Science, 44, 53 pp.

Foreman M.G.G. (1977). Manual for tidal heights analysis and prediction. Sidney, BC: Institute of Ocean Sciences, Pacific Marine Science Report 77-10, 97 pp.

Galé C., Ubide T., Lago M., Gil-Imaz A., Gil-Peña I., Galindo-Zaldívar J., Rey J., Maestro A., and López-Martínez J. (2014). Vulcanismo cuaternario de la Isla Decepción (Antártida): una signatura relacionada con la subducción de la Fosa de las Shetland del Sur en el dominio de tras-arco de la Cuenca de Bransfield. Boletín Geológico y Minero, Vol 125 (1), pp 31-52.

Galindo-Zaldívar, J., Gamboa, L., Maldonado, A., Nakao, S. and Bochu, Y. (2004). Tectonic development of the Bransfield basin and its prolongation to the South Scotia Ridge, northern Antarctic Peninsula. Marine Geology, Vol 206, pp 267–282.

García F., Palacio C., García U. (2011). Tide constituents at Santa Marta Bay (Colombia). Dyna, Año 78, No. 167, pp. 142-150.

García M.A. (1994). Oceanografía dinámica de un mar Antártico: el Estrecho de Bransfield. Investigación Española en la Antártida. Seminario de la Universidad Internacional Menéndez Pelayo, Santander, 19–23 Julio, 1993. Madrid: Centro de Publicaciones, Ministerio de Educación y Ciencia, pp 193–208.

Gill A. E. (1982). Atmosphere-Ocean Dynamics. Volumen 30 de International Geophysics. Editor Academic Press, 1982. 662 pp., San Diego, California.

Giner-Robles J.L., González-Casado J.M., Gumiel P., Martín-Velázquez S. and García-Cuevas C. (2003). A kinematic model of the Scotia plate (SW Atlantic Ocean). Journal of South American Earth Sciences, Vol 16, pp 179–191.

Godin G. (1972). The analysis of tides. Toronto: University of Toronto Press, 264 pp.

González-Casado J.M., López-Martínez J., Giner J., Durán J.J. and Gumiel P. (1999). Análisis de la microfacturación en la Isla Decepción, Antártida Occidental. Geogaceta, Vol 26, pp 26-30.

González-Casado J.M., Giner-Robles J. and López-Martínez J. (2000). Bransfield Basin, Antarctic Peninsula: Not a normal backarc basin. Geology, Vol 28, pp 1043-1046.

González-Ferrán, O. (1985). Volcanic and tectonic evolution of the northern Antarctic Peninsula-Late Cenozoic to recent. Tectonophysics, Vol (114), pp 389-409.

González-Ferrán, 0 . (1991): The Bransfield Rift and its active volcanism. En: Thomson M.R.A., Crame J.A., Thomson J.W. (Eds.) Geological Evolution of Antarctica. Cambridge University Press, Cambridge, pp 505-509.

Hugentobler U., Schaer S. and Fridez P. (Eds.). Bernese GPS Software Version 4.2. Astronomical Institute, University of Berne. 2001

Heiskanen W.A. & Moritsz H., Physical Geodesy. Instituto Geografico Nacional. 364 pp. Madrid. 1985.

Ibañez J.M., Almendros J. Carmona E., Martínez-Arevalo C., Abril M., The recent seismo-volcanic activity at Deception Island volcano. Deep-Sea Research II 50, pp. 1611–1629, 2003.

Jigena B., Vidal J., and Berrocoso M. (2014). Determination of the mean sea level at Deception and Livingston Islands, Antarctica. Antarctic Science, Volume 27(01), pp 101-102.

King M.A. and Padman L. (2005). Accuracy assessment of ocean tide models around Antarctica. Geophysical Research Letters, 32, L23608.

Lawver L.A., Keller R.A. Fisk M.R. and Strelin J.A. (1995). Bransfield Strait, Antarctic Peninsula: Active extension behind a dead arc. En: Backarc Basins: Tectonics and Magmatism, Taylor B. (Ed.), pp. 315–342, Plenum, New York.

Lawver L.A., Sloan B.J. Barker D.H.N., Ghidella M., Von Herzen R.P., Keller R.A., Klinkhammer G.P. and Chin C.S. (1996). Distributed active extension in Bransfield Basin, Antarctic Peninsula: Evidence from multi-beam bathymetry. GSA Today, 6, pp 1–6.

Ledesma R., Macbeth G. & Cortada N. (2008). Tamaño del efecto: revisión teórica y aplicaciones con el sistema estadístico ViSta. Revista Latinoamericana de Psicología, volumen 40, No. 3, pp 425-439.

Leick A. (2004). GPS Satellite Surveying. John Wiley & Sons, Inc., Eds., 3th Edition. New Jersey, USA.

Lemoine F. G., Kenyon S. C., Factor J. K., Trimmer R. G., Pavlis N. K., Chinn D. S., Cox C. M., Klosko S. M., Luthcke S. B., Torrence M. H., Wang Y . M., Williamson R. G., Pavlis E. C., Rapp R. H. & Olson T. R. (1998). The development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96, NASA Technical Report NASA/TP-1996n8-206861.

Lenn Y.D., Chereskin T.K. and Glatts R.C. (2003) Seasonal to tidal variability in currents, stratification and acoustic backscatter in an Antarctic ecosystem at Deception Island. Deep-Sea Research II, 50, 1665–1683. doi:10.1016/S0967-0645(03)00085-7

Livermore R., Balanyá J.C., Maldonado A., Martínez J.M., Rodríguez-Fernández J., Sanz de Galdeano C., Galindo-Zaldívar J., Jabaloy A., Barnolas A., Somoza L, Hernández-Molina J., Suriñach E. and Viseras C. (2000). Autopsy on a dead spreading center: The Phoenix

Ridge, Drake Passage, Antarctica. Geology, Vol 28 (7), pp 607-610. doi: 10.1130/0091-7613(2000) 28<607:AOADSC> 2.0.CO;2

López O., García M.A. and Sánchez-Arcilla A.S. (1993). Marea y circulación en el Estrecho de Bransfield durante el verano austral 92/93. In Cacho J. and Serrat D. (Eds). Actas del V Simposio Español de Estudios Antárticos. Madrid. Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología, 389–401.

López O., García M.A.and Sánchez-Arcilla A.S. (1994). Tidal and residual currents in the Bransfield Strait, Antarctica. Annales Geophysicae, 12, 887–902. 1994.

López O., García M.A., Gomis D., Rojas P., Sospedra J. and Sánchez-Arcilla A.S. (1999). Hydrographic and hydrodynamic characteristics of the eastern basin of the Bransfield Strait (Antartica). Deep-Sea Research I, 46, 1755–1778.

Maestro A., Somoza L., Barnolas A., Rey J., Martínez-Frías J. & López-Martínez, J. (2007). Active tectonics, fault patterns and stress field of Deception Island: A response to oblique convergence between the Pacific and Antarctic Plates. Journal of South American Earth Sciences, 23, pp 253-268.

Maldonado A., Larter R.D. and Aldaya F. (1994). Forearc tectonic evolution of the South Shetland Margin, Antarctic Peninsula. Tectonics, Vol 13, pp 1345–1370.

Martín-Furones, A. (2000). Análisis y ajuste de modelos de geoide. Observación y cálculo de la red gravimétrica de tercer orden en la Provincia de Valencia. Phd Thesis, Valencia (España). Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Noviembre 2000, 163 pp.

Martí J., Vila J. & Rey J. (1996). Deception Island (Bransfield Strait, Antarctica); an example of a volcanic caldera developed by extensional tectonics. In: McGuire, W.J, Jones, A.P., Neuberg, J., (Eds). Volcano instability on the earth and other planets. London: Geological Society, London, Special Publications 110, pp 253-265.

Mayer-Guerr T., Zehentner N., Klinger B. and Kvas A. (2014). The satellite-only gravity field model ITSG-GRACE2014s. Institute of Theoretical Geodesy and Satellite Geodesy, Graz University of Technology. Austria, http://itsg.tugraz.at/research/ITSG-Grace2014

Meredith M.P., Brandon A., WallaceM.I., Clarke A., Leng M.J., Renfrew M.A.,van Lipzig N.P.M. and King J.C. (2008). Variability in the freshwater balance of northern Margarite Bay, Antarctic Peninsula: results from 18 O. Deep-Sea Research II, 55, 309–322.

Muñoz Pérez J.J., Abarca Molina J.M. (2009). Effect of wind and atmospheric pressure variations on the mean sea level of salt marshes and estuaries. Revista de Obras Públicas, No. 3505, Año 156. ISSN 0034-8619.

Padman L., Fricker H.A., Coleman R., Howard S. and Erofeeva L. (2002). A new tide model for the Antarctic ice shelves and seas. Annals of Glaciology, 34, 247–254.

Pail R., Goiginger H., Schuh W.-D. , Höck E., Brockmann J. M. ,Fecher T., Gruber T., Mayer-Gürr T.,Kusche J., Jäggi A. & Rieser D. (2010). Combined satellite gravity field model GOCO01S derived from GOCE and GRACE. Geophysical Research letters, Vol. 37, L20314, American Geophysical Union, 0094-8276/10/2010GL044906, doi:10.1029/2010GL044906.

Paredes C. (2005). Distribución estocástica tridimensional condicionada de la fracturación potencialmente responsable de la actividad sismo volcánica en Isla Decepción (Shetland del Sur, Antártida), Proyecto Vishnu, 2005. Disponible en: http://www.dmami.upm.es/ncadena/VISHNU.htm

Pavlis N.K, Holmes S.A, Kenyon S.C. & Factor J.K. (2012). The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). Journal of Geophysical Research, Vol. 117, Volume 117, Issue B4, 19 APR 2012B04406.

Pelayo, A. and Wiens, D. 1989. Seismotectonics and relative plate motions in the Scotia Sea region. Journal of Geophysical Research, Vol 96, pp 7293–7320.

Prates, Gonçalo, (2012). Tratamiento de series temporales geodésicas GNSS-GPS para seguimiento y vigilancia de la actividad volcánica: Dilatómetro e Inclinómetro Espacial. Aplicación a las Islas Decepción (Antártida) y El Hierro (Canarias). Thesis Phd, Departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz.

Prates G., Berrocoso M., Fernández-Ros A. and García-García A. (2013). Enhancement of sub-daily positioning solutions for surface deformation monitoring at Deception volcano (South Shetland Islands, Antarctica), Bull Volcanol, Volume 75, Number 2.

Rakusa-Suszczewski S., Mietus M. and Piasecki J. (1992). Pogoda i klimat In Rakusa-Suszczewwski S., Eds. Zatoka Admiralicji Antarktyki. Dziekanów Les'ny. Poland. Institut Ekologii PAN, 41–50.

Reyes R. B., Nagai M., Kamiya Y., Tipdecho T. & Ninsawat S. (2015). Effect of sea level rise in the validation of geopotential/geoid models in Metro Manila, Philippines. Survey Review 342 (47), pp 211-219.

Robertson-Maurice S.D., Wiens D.A. and Shore P.J., Dorman L.,Adaros R. and Vera E. (2001). Seismicity and tectonics of the South Shetland Islands Region from combined land-sea seismograph deployment. Journal of Geophysical Research, Vol. 108, pp 4.1 - 4.12

Robertson-Maurice S.D., Wiens D.A. and Shore P.J. (2003). Seismicity and tectonics of the South Shetland Islands and Bransfield Strait from a regional broadband seismograph deployment. Journal of Geophysical Research, Vol. 108, No. B10, 2461, doi:10.1029/2003JB002416

Schreider Al. A., Schreider A.A., GalindoZaldivar J., Maldonado A., Gamboa L., Martos Y., Lobo F. and Evsenko E.I. (2015). Structure of the Bransfield Strait Crust. Oceanology Vol 55 (1) pp 112-123.

Schöne T., Pohl M., Zakrajsek A.F.and Schenke H.W. (1998). Tide gauge measurements, a contribution for the long-term monitoring of the sea level. In: Wiencke, Ferreyra, Arntz, Rinaldi (Eds.): The Potter Cove coastal ecosystem, Antarctica, Berichte zur Polarforschung, 299, 12-14.

SCAR (Scientific Committee for Antarctic Research). (1993). Antarctic digital database on CD-ROM. Cambridge: SCAR.

Seeber G. (2003). Satellite Geodesy. Second Revised Edition, 612 pp, Gruyter Eds. 2003

SHN (Servicio de Hidrografía Naval de la República Argentina). (1970). Informe Campaña Oceanográfica Isla Decepción 1970. Departamento de Oceanografía, Servicio de Hidrografía Naval, 70 pp. Buenos Aires, Argentina.

Smellie J.L., Pankhurst R.J., Thomson M.R.A. and Davies R.E.S. (1984). The geology of the South Shetland Islands:VI. Stratigraphy, geochemistry and evolution. British Antarctic Survey Scientific Reports, 87, 85 pp.

Smellie J.L. 1991. Stratigraphy, provenance and tectonic setting of (?) Late Paleozoic-Triassic sedimentary sequences in northern Graham Land and South Scotia Ridge. In: Thomson M.R.A., Crame J.A., Thomson J.W. (Eds.), Geological Evolution of Antarctica. Cambridge University Press, Cambridge, pp 411-417.

Smellie J.L., Liesa M., Muñoz J.A., Sabàt F., Pallàs R. and Willam R.C.R. (1995). Lithostratigraphy of volcanic and sedimentary sequences in central Livingston Island, South Shetland Islands. Antarctic Science, Vol 7 (1), pp 99-113.

Smellie J.L. (2001). Lithostratigraphy and volcanic evolution of Deception Island, South Shetland Islands. Antarctic Science, 13 (2), pp 188–209.

Smellie, J.L. (2002). The 1969 subglacial eruption on Deception Island (Antarctica): events and processes during an eruption beneath a thin glacier and implications for volcanic hazards. In Smellie J.L. & Chapman M.G., (Eds.). Volc, ano-ice interaction on Earth and Mars. Geological Society of London, Special Publication, No. 202, pp 59–79.

Smellie J. L., J. López-Martínez, J. W. Thomson, and M. R. A. Thomson (2002). Geology and geomorphology of Deception Island,., British Antarctic Survey, BAS GEOMAP Series, Sheets 6-A and 6-B, 1:25 000, supplementary text, Cambridge, 77 pp.

Smith Jr. K.L. , Baldwin R.J., Glatts R.C., Chereskin T.K., Ruhl H. and Lagun V. (2003). Weather, ice, and snow conditions at Deception Island, Antarctica: long time-series photographic monitoring. Deep-Sea Research II, 50, 1649–1664.

Smithson M.J. (1992). Pelagic tidal constants 3, IAPSO Publication Scientifique No. 35. Birkenhead: IAPSO, IUGG, 191 pp.

Solari M.A., Hervé F., Martinod J., Le Roux J.P., Ramirez L.E. and Palacios C. (2008). Geotectonic evolution of the Bransfield Basin, Antarctic Peninsula: insights from analogue models. Antarctic Science, Vol 20 (2), pp 185–196.

Somoza L., Martínez-Frías J., Smellie J.L., Rey J., and Maestro A. (2004). Evidence for hydrothermal venting and sediment volcanism discharged after recent short-lived volcanic eruptions at Deception Island, Bransfield Strait, Antarctica. Marine Geology Vol. 203, Iss. 1-2, pp. 119--140.

Speroni J.O., Dragani W., D'Onofrio E.E., Drabble M.R. and Mazio C.A. (2000). Estudio de la marea en el borde de la Barrera Larsen, Mar de Weddell Noroccidental, Antártida. GeoActa, 25, 1–11.

Taylor F. W., Bevis M.G., Dalziel I.W.D., Smalley Jr.R. Frohlich C., Kendrick E., Foster J., Phillips D. and Gudipati K. (2008). Kinematics and segmentation of the South Shetland Islands-Bransfield basin system, northern Antarctic Peninsula. Geochemistry Geophysics Geosystems, Vol 9 (4), Q04035, doi:10.1029/2007GC001873

Thompson R.O.R.Y. (1983). Low pass filter to suppress inertial and tidal frequencies. Journal of Physical Oceanography, 13, 1077–1083.

Torge W.(2001). Geodesy, Third Edition. Gruyter Eds. Berlin, NewYork, 2001. 368 pp.

Torrecillas C., Berrocoso M. & Garcia A. (2006). The Multidisciplinary Scientific Information Support System (SIMAC) for Deception Island, Antarctica. Contributions to Global Earth Sciences. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 397–402.

Torrecillas C., Berrocoso M., Perez-Lopez R. & Torrecillas, M.D. (2011). Determination of volumetric variations and coastal changes due to historical volcanic eruptions using historical maps and remote-sensing at Deception Island (West Antarctica). Journal of Geomorphology 136, 6–14.

Torrecillas C. El Sistema de Información Multidisciplinar de Apoyo Científico (SIMAC) para la Isla Decepción (Islas Shetland del Sur, Antártida), Phd Thesis, Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía, Departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz, España, 2011

Torge W. Geodesy. Second Edition, Walter de Gruyter Eds., Berlin, New York,. 1967.

Kawasaki, N. (1993). Parametric study of thermal and chemical nonequilibrium nozzle flow, M.S. Thesis, Department of Electronic Engineering, Osaka University, Osaka, Japan.

UNESCO. (1981). Tenth report of the joint panel on oceanographic tables and standards. Technical Papers in Marine Science, 36, 25 pp.

UNESCO. (1988). Intergovernmental Oceanographic Commission workshop on sea level measurements in hostile conditions, 28–31 March 1988, Bidston, UK. IOC Workshop Report, 54, 81 pp.

UNESCO. (1994). Intergovernmental Oceanographic Commission manual on sea level measurement and interpretation. Vol. II. Emerging technologies. UNESCO Manuals and Guides, 14, 77 pp.

Valencio D. A., Mendía J. E. & Vilas J. F. (1979). Paleomagnetism and K-Ar age of Mesozoic and Cenozoic igneous rocks from Antarctica. Earth and Planetary Science Letters, 45, 61-68.

Vidal M., Berrocoso M., Jigena B. (2011). Hydrodynamic Modeling of Port Foster, Deception Island (Antarctica). In: Nonlinear and Complex Dynamics: Applications in Physical, Biological, and Financial Systems. Pages 193-203, 2011. Available at: http://springer.libdl.ir/chapter/10.1007/978-1-4614-0231-2_16

Vidal J., Berrocoso M., Fernández-Ros A. (2012) Study of tides and sea levels at Deception and Livingston islands, Antarctica. Antarctic Science 24(2), pp 193–201.

Vila J. (1991). Estudis geofísics a l'illa Decepción. Shetland del Sud, Antártida. Phd Thesis, Departament de geología Dinàmica, Geofísica i Paleontologia, Universitat de Barcelona.

Walters R.A. and Heston C. (1982). Removing tidal period variations from time-series data using low-pass digital filters. Journal of Physical Oceanography, 12, 112–115.

Willmott V., Domack E., Padman L. and Canals M. (2007). Glaciomarine sediment drifts from Gerlache Strait, Antarctic Peninsula.In: Hambry M., Christoffersen P., Glasser N.F., Hubbard B. (Eds). Glacial sedimentary processes and products. IAS Special Publication. New York: Blackwells, 67–84.

Wunsch C.and Stammer C. (1997). Atmospheric loading and the ''inverted barometer'' effect. Reviews of Geophysics, 35, 79–107.

# Listado de acrónimos

BAA: Base Antártica Argentina

BAB: Base Antártica Británica

BABL: Base Antártica Búlgara

BACH: Base Antártica Chilena

BAE: Base Antártica Española

BAP: Base Antártica Polaca

BAUS: Base Antártica Estadounidense

GNSS: Global Navigation Satellite System, son las siglas que definen a todos los sistemas de navegación por satélite, como el GPS, GLONASS, Galileo, COMPAS, IRNSS

GPS: Global Positioning System, son las siglas que definen al Sistema de Posicionamiento Global estadounidense.

GPST: GPS Time o Tiempo GPS, En el sistema tiempo que utiliza el sistema GPS y es mantenido solamente por el Observatorio Naval de los Estados Unidos (USNO), pero adaptado a las fracciones del Tiempo Universal Coordinado (UTC).

IERS: International Earth Rotation Service, es el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra , establecido conjuntamente por la Unión Astronómica Internacional (IAU) y la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (IUGG). Tiene la misión proveer a la comunidad científica y técnica losvalores de referencia para los parámetros de orientación de la Tierra (EOP) que surgen al considerar el movimiento del polo y las variaciones de la velocidad de rotación de la Tierra.

IGS: International GNSS Service, es un servicio internacional avalado por Asociación Internacional de Geodesia y está compuesto por la federación voluntaria de más de 200 agencias en el mundo que se encargan de reunir datos y recursos GNSS para proporcionar productos precisos a la comunidad científica y civil que hacen uso de los servicios GNSS.

ITRF: IERS Terrestrial Reference Frame, Marco de referencia terrestre internacional definido, materializado y mantenido por el IERS. Sus coordenadas están relacionadas a un sistema con origen en el centro de masa de la Tierra (incluidos los océanos y la atmósfera) y orientación de sus ejes consistentes con las resoluciones emanadas de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica

(IUGG) y la Unión Astronómica Internacional (IAU). El elipsoide de referencia que utiliza es el GRS80, que tiene los mismos parámetros que el WGS84.

LAGC-UCA: Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía de la Universidad de Cádiz.

PTG Sensor principal de presión (en ingles: Principal Tide Gauge). Es el sensor de presión que se deja fondeado para la adquisición de los datos de marea.

REGID: Red Geodésica Isla Decepción

RENID: Red de Nivelación Isla Decepción

RGAE Red Geodésica Antártica Española

RINEX: Siglas en inglés de Receiver INdependent Exchange, es un formato de ficheros de texto estandarizado, orientado a almacenar los datos obtenidos por receptores GNSS, como GPS, GLONASS, Galileo, EGNOS, WAAS, etc.

TGBM: Acrónimo de las palabras en inglés Tide Gauge Benchmark, definido como marca o vértice de referencia de mareógrafo, dotado con coordenadas geodésicas tridimensionales, latitud, longitud, altura elipsoidal y altura ortométrica, al cual se encuentran referidas todas las medidas realizadas por el sensor del mareógrafo.

TGAR Marca auxiliar de referencia de mareógrafo (en inglés: Tide Gauge Auxiliary Reference), es una marca dotada con coordenadas geodésicas tridimensionales, latitud, longitud, altura elipsoidal y altura ortométrica que se encuentra enlazado al TGBM, para recuperar las coordenadas fijas originales en caso de pérdida o destrucción del TGBM.

TSG Sensor de presión colocado en una regla de marea o regla de nivelación (en ingles: Tide Staff Gauge), utilizado para realizar el control altimétrico de las medidas de marea

SCAR Comité Científico de Investigación Antártica ( en inglés Scientific Committee on Antarctic Research)

SHN: Servicio de Hidrografía Naval de la República Argentina.

SIG: Sistemas de Información Geográfica.

SIMAC: Sistema de Información Multidisciplinar de Apoyo Científico para la Isla Decepción.

STGPS Estación GPS, perteneciente a una red geodésica antártica, como la REGID o la RENID y vinculada altimétricamente a una estación de marea.

UCA: Universidad de Cádiz.

UTC: Tiempo Universal Coordinado ( en ingles: Universal Time Coordinated)

WGS84: Sistema de Referencia Global 1984 (en inglés World Geodetic System, 1984).

*Un científico debe tomarse la libertad de plantear cualquier cuestión,*
*de dudar de cualquier afirmación, de corregir errores.*

Robert Oppenheimer (1904-1967)
Físico estadounidense.

*Visita Interiora Terras Rectificatur Invenies Ocultum Lapidum*

Principio de filosofía hermética

*Tesis Doctoral*