



**TRABAJOS FIN DE MÁSTER 2020 DE LOS ALUMNOS
DE LA ESCUELA DE ESTUDIOS SUPERIORES DE LA ARMADA**



MINISTERIO DE DEFENSA



- 1. ESTUDIO DEL ERROR EN EL CÁLCULO DE LA POSICIÓN DEBIDO
A LAS IRREGULARIDADES DEL CAMPO GRAVITATORIO
TERRESTRE Y A PERTURBACIONES ATMOSFÉRICAS.....** 5
Teniente de Navío Víctor de Ory Guimerá

- 2. FLEXIÓN DE LA LITOSFERA PRODUCIDA POR ELEMENTOS
GEOLÓGICOS AISLADOS SITUADOS EN DISTINTOS AMBIENTES
TECTÓNICOS.** 97
Teniente de Navío Julián Fiz Barrena

Contenido

1.1 Tabla de figuras.....	11
1.2 Índice de tablas.....	14
2 Introducción.....	15
2.1 Contexto del Trabajo en el marco del Máster Ciencia y Tecnología Espacial.....	16
3 Metodología.....	17
3.1 Contexto de la investigación.....	17
3.2 Problema central del TFM.....	17
3.2.1 Descripción general.....	17
3.3 Preguntas de investigación.....	18
3.3.1 Preguntas de investigación principales.....	18
3.4 Hipótesis de trabajo.....	19
3.5 Objetivos.....	19
3.6 Recursos empleados en la investigación.....	20
4 Fundamentos teóricos.....	21
4.1 Antecedentes históricos.....	21
4.1.1 El cálculo de la latitud.....	21
4.1.2 El problema del cálculo de la longitud.....	23
4.1.3 Determinación de la forma de la Tierra.....	24
4.1.4 La misión geodésica hispanofrancesa de 1735.....	26
4.1.5 Desarrollo de la geodesia en los siglos XIX y XX.....	27
4.2 Elipsoide de referencia.....	28
4.2.1 Definición.....	28
4.3 Datum geodésico.....	29
4.4 Principales elipsoides de referencia a nivel global.....	30
4.5 El geoide.....	31
4.5.1 Definición.....	31
4.6 Modelos gravimétricos de la Tierra.....	32
4.6.1 Medición del campo gravitatorio terrestre.....	32
4.6.2 Mareas de equilibrio.....	32
4.7 Refracción astronómica en la atmósfera terrestre.....	34
4.7.1 Estructura de las capas de la atmósfera.....	34

4.7.2	35
4.7.3	Efecto de la corriente de chorro estratosférica en el índice de refracción	36
4.7.4	Dependencia del índice de refracción con la temperatura, humedad, presión y otras variables.....	39
4.7.5	Ondas de gravedad atmosféricas.....	46
4.7.6	Mareas atmosféricas.....	47
5	Resultados	49
5.1	Diferencia en la geolocalización entre dos modelos terrestres diferentes	50
5.2	Mareas de equilibrio:.....	65
6	Conclusiones	73
7	Líneas futuras de investigación:.....	75
8	Bibliografía	76
9	Anexos	78
9.1	Demostración 1. Representación del radio de la elipse en función de la latitud y semiejes.....	78
9.2	Demostración 2. Relación entre la desviación en arcosegundos y el error en la superficie en metros.	80
9.3	Coordenadas astronómicas.....	82
9.3.1	Sistema de coordenadas horizontal.	82
9.3.2	Sistema de coordenadas ecuatoriales horarias.....	82
9.3.3	Sistema de coordenadas ecuatoriales absolutas.....	83
9.4	Código Python 1. Creación del mapa de desviación cenital entre dos modelos terrestres diferentes de la librería ICGEM.	84
9.5	Código Python 2. Mareas de equilibrio.....	85
9.6	Código Python 3. Mareas de equilibrio. Generación de gráficas.	91
9.7	Código Python 4. Mareas de equilibrio. Generación de mapas.	92
9.8	Código Python 6. Cálculo del índice de refracción.....	93
9.9	Código Python 7. Cálculo del radio terrestre para un elipsoide y cálculo de la desviación en superficie según la latitud del elipsoide.....	95
9.10	Código Python 8. Cálculo del índice del índice de refracción y gradiente de refracción de dos puntos.....	95

1.1 Tabla de figuras

Figura 1: Latitud geocéntrica y latitud geográfica (elaboración propia)	21
Figura 2: Astrolabio.	22
Figura 3: Cuadrante.....	22
Figura 4: Sextante.....	23
Figura 5: Prototipo de celatone creado por Galileo Galilei.....	24
Figura 6: Diferentes modelos de la Tierra sugeridos por Cassini y Newton/Huygens.....	25
Figura 7: Expediciones a Laponia y Virreinato del Perú	26
Figura 8: Elipse y semiejes. (Elaboración propia).	28
Figura 9: Superficie del geoide y elipsoide y ángulo entre sus céntesis. (Elaboración propia).	31
Figura 10: Mareas de equilibrio debidas al efecto lunar, con la Luna sobre el ecuador.	33
Figura 11: Mareas de equilibrio debidas al efecto lunar sobre una cierta latitud.....	33
Figura 12: Refracción de la luz considerando una hipotética atmósfera de tres capas (Elaboración propia).....	35
Figura 13: Refracción debido a un frente de presiones o temperatura (Elaboración propia)	36
Figura 14: Efecto del Jet-Stream sobre Europa y Océano Atlántico para el 09 de septiembre de 2020, medido en millas por hora (1 mph ≈ 1.61kmh).....	37
Figura 15: Efecto del Jet Stream en el hemisferio norte en intervalos trimestrales.	38
Figura 16: Efecto del Jet Stream en el hemisferio sur en intervalos trimestrales. De ambas figuras se deduce que el efecto de corriente en chorro es más probable en los meses fríos para cada hemisferio y para latitudes medias.....	38
Figura 17: Variación del índice de refracción según diferentes variables atmosféricas.	40
Figura 18: Índice de refracción en función de la altura para una longitud de onda de 500 nm y una atmósfera estándar. Gráfica extraída de [22].....	40
Figura 19: Navegación de Nueva York a Lisboa, dividida en cinco puntos sobre un mapa de temperaturas donde los colores cálidos indican temperaturas más altas y los colores fríos temperaturas más bajas. Datos tomados para el día 22/09/2020 a 18:30 horas (UTC). Mapa extraído de la página web.....	42
Figura 20: Variación del índice de refracción con la altitud.	44
Figura 21: Gradiente vertical de índice de refracción en función de la altitud.	45
Figura 22: Gradiente horizontal de índice de refracción en función de la altitud.	45
Figura 23: Imagen satélite de ondas de gravedad. Las ondas de gravedad producen un patrón periódico debido a oscilaciones de temperatura y condensación.	46
Figura 24: Presión en mb (eje Y) en función de la hora local en formato 24h (eje X) para diferentes estaciones meteorológicas en Argentina.....	47
Figura 25: Mareas atmosféricas para regiones de diferente latitud.....	48
Figura 26: Geoide (rojo) y elipsoide (negro). Los céntesis de ambas figuras no necesariamente pasan por sus respectivos centros de masas (elaboración propia).....	49
Figura 27: Elipsoide oblat genérico.	50
Figura 28: Geoide genérico (proporciones de las irregularidades en factor de escala 10000 para una mejor visualización).	50
Figura 29: Coeficientes armónicos para la elaboración de un geoide WGS72.	51
Figura 30: Coeficientes armónicos para la elaboración de un elipsoide WGS72. Hemos eliminado todas las filas excepto las correspondientes a (L, M): (0,0) y (2,0).....	52

Figura 31: Visualización del coeficiente armónico (2,0) (elipsoide regular y simétrico en los polos). Imagen extraída de la página web.....	52
Figura 32: Porción de 8x6 celdas tomada sobre la matriz de 59x117 celdas calculada. Los datos indican la desviación angular en arcosegundos, para varios puntos de la Tierra, entre el céntit de un modelo de geoide WGS72 y el céntit de un modelo de elipsoide WGS72.....	53
Figura 33: Representación de la desviación del céntit entre el modelo de elipsoide WGS72 y el modelo de geoide WGS72, en arcosegundos.....	54
Figura 34: Representación de las desviaciones cenitales en segundos de arco de ambos modelos WGS72 en Google Earth.....	55
Figura 35: Representación de la desviación cenital entre un modelo de geoide EGM2008 y un modelo de geoide WGS66.....	55
Figura 36: Cinturón o anillo de fuego del Pacífico.....	56
Figura 37: Misma representación que la Figura 35, esta vez centrada en longitud 100°W para una mejor comparación visual con la Figura 36.....	56
Figura 38: Movimientos de placas tectónicas.....	57
Figura 39: Movimiento de placas tectónicas.....	58
Figura 40: Gran desviación cenital de 33 arcosegundos en posición 36.3°N 11°W (círculo rojo) para un mapa escalado hasta 40 arcosegundos.....	58
Figura 41: Posición del epicentro del Terremoto de Lisboa de 1755, coincidente con la anomalía calculada en la Figura 40.....	59
Figura 42: Geoide EGM2008 vs geoide WGS66 en escala de 0 a 12 arcosegundos.....	59
Figura 43: Desviaciones del geoide WGS66 en comparación al geoide EGM2008 sobre España y zona mediterránea escalado para desvíos máximos de 12 arcosegundos.....	60
Figura 44: Desviaciones del geoide WGS66 en comparación al geoide EGM2008 sobre España y zona mediterránea escalado para desvíos máximos de 40 arcosegundos.....	60
Figura 45: Geoide EGM2008 vs geoide WGS72.....	61
Figura 46: Desviaciones del geoide WGS72 en comparación al geoide EGM2008 sobre España y zona mediterránea escalado para desvíos máximos de 40 arcosegundos.....	62
Figura 47 Geoide EGM2008 vs elipsoide EGM2008.....	62
Figura 48: Desviaciones del elipsoide EGM2008 en comparación al geoide EGM2008 para la región centrada sobre el Mar de Filipinas. Ubicación de la Fosa de las Marianas marcada en círculo rojo.....	63
Figura 49: Desviaciones cenitales sobre la Fosa de las Marianas para nuestros modelos terrestres estudiados.....	63
Figura 50: Desviaciones del elipsoide EGM2008 en comparación al geoide EGM2008 sobre España y zona mediterránea escalado para desvíos máximos de 40 arcosegundos.....	64
Figura 51: Componentes horizontales de mareas calculadas. (Elaboración propia).....	65
Figura 52: Desviaciones cenitales en miliarcosegundos por efecto de mareas de equilibrio para los puntos elegidos A-E en el periodo de 11/10/2020 a 12:00 UTC a 12/10/2020 a 12:00 UTC.....	66
Figura 53: Desviación cenital en miliarcosegundos por efecto de las mareas de equilibrio sobre los cinco puntos elegidos, para el día 11/11/2020 y a las 12:00 horas (UTC).....	67
Figura 54: Desviaciones cenitales para un punto F en coordenadas $\varphi=15^{\circ}\text{S}$, $\lambda=139^{\circ}\text{E}$ (Golfo de Carpentaria, Australia) en el periodo del 01 al 08 de enero de 2020.....	67

Figura 55: Desviaciones cenitales para un punto G en coordenadas $\varphi=0^\circ\text{N}$, $\lambda=0^\circ\text{W}$ (Golfo de Guinea) en el periodo del año 2020.	68
Figura 56: Desviaciones cenitales para un punto H en coordenadas $\varphi=45^\circ\text{N}$, $\lambda=2^\circ\text{W}$ (Bahía de Arcachón, Francia) en el periodo del año 2020.....	68
Figura 57: Desviaciones cenitales para un punto I en coordenadas $\varphi=34^\circ\text{S}$, $\lambda=79^\circ\text{W}$ (Isla Robinson Crusoe, Archipiélago de Juan Fernández, Chile) en un periodo de tres años.	68
Figura 58: Puntos F-I elegidos sobre un mapa de desviaciones cenitales producidas por efecto de mareas de equilibrio para el día 01/01/2020 a 00:01 horas (UTC).....	69
Figura 59: Eclipse lunar del 05/07/2020. Máxima ocultación lunar a 04:31:11 (UTC) sobre Sudamérica y Antártida. Imagen extraída del Almanaque Náutico 2020 [34]......	69
Figura 60: Desviaciones cenitales por efecto de mareas calculadas para el 05/07/2020 a las 04:31:11 (UTC).....	70
Figura 61: Desviación cenital por efecto de mareas durante la Luna llena del 07/04/2020 a 18:08 horas (UTC).	71
Figura 62: Desviación cenital durante la Luna llena del 07/04/2020 a 18:08 horas (UTC) en proyección acimutal de Lambert.....	71
Figura 63: Elipsoide oblato y radio terrestre en función de su latitud (elaboración propia).	78
Figura 64: Error en posición considerando un error de 1 arcosegundo y un valor del radio terrestre de 6371 km sobre una idealización de Tierra esférica (elaboración propia).	80
Figura 65: Sistema de coordenadas horizontal (Elaboración propia).	82
Figura 66: Sistema de coordenadas ecuatoriales horarias (Elaboración propia).....	83
Figura 67: Sistema de coordenadas ecuatoriales absolutas (Elaboración propia).	83

1.2 Índice de tablas.

Tabla 1: Algunos elipsoides de referencia más utilizados en el siglo XIX y primeras décadas del siglo XX.....	27
Tabla 2: Elipsoides de referencia más utilizados en España desde 1970.....	29
Tabla 3: Elipsoides de referencia más utilizados históricamente a nivel internacional.....	30
Tabla 4: Datos meteorológicos obtenidos para una altura a nivel del mar, en fecha 21/09/2020 a 18:30 UTC.....	42
Tabla 5: Temperatura y presión elegidos para dos puntos separados 100 km.....	43
Tabla 6: Resumen de los modelos terrestres estudiados.....	64
Tabla 7: Dependencia de n con diferentes variables atmosféricas.....	74
Tabla 8: Resumen de los efectos atmosféricos estudiados y su efecto en la geolocalización.....	74
Tabla 9: Error sobre la superficie, para varias latitudes y para 1 arcosegundo de desviación, tomando como referencia el elipsoide GRS-80.....	81

INDICE

RESUMEN	103
1. CAPÍTULO 1. Introducción	105
1.1. Objetivos	106
1.2. Estructura del trabajo	106
1.3. Contexto regional y áreas de estudios	106
1.3.1. Monte submarino Seine	106
1.3.2. Montes submarinos en el mar de Scotia	108
1.3.3. Volcán Kilimanjaro	109
2. CAPÍTULO 2. Aspectos geofísicos	111
2.1. Concepto de litosfera elástica	111
2.2. Conceptos de isostasia y flexión litosférica	111
3. CAPÍTULO 3. Datos y Metodología	115
3.1. Fuentes de datos	115
3.2. Metodología	115
4. CAPÍTULO 4. Modelización gravimétrica y flexión litosférica	119
4.1. Monte submarino Seine	120
4.2. Montes submarinos en el mar de Scotia	122
4.3. Volcán Kilimanjaro	124
4.4. Discusión General	126
5. CAPÍTULO 5. Conclusiones	129
REFERENCIAS	131
ANEXOS 1	135
ANEXOS 2	139
ANEXOS 3	143
ANEXOS 4	147