

**ESTUDIO
GRAVIMÉTRICO
DE LA
PENÍNSULA IBÉRICA
Y BALEARES**



Ministerio de Fomento
Instituto Geográfico Nacional

ESTUDIO GRAVIMÉTRICO
DE LA
PENÍNSULA IBÉRICA Y BALEARES

J. MEZCUA, A. GIL, Y R. BENARROCH

Instituto Geográfico Nacional

Depósito Legal: M. 40.887-1996

NIPO: 162-96-005-X

Impreso en el Instituto Geográfico Nacional

I. Introducción

El estudio del campo de gravedad corresponde con una de las primeras investigaciones que sobre campos potenciales de la Tierra se han realizado a nivel global. Sin embargo, la extraordinaria complicación que ha supuesto hasta los años veinte su observación por métodos pendulares, no ha permitido disponer de suficiente número de observaciones de gravedad sobre la superficie terrestre. A partir de esta década se comienza a observar con gravímetros, instrumentos de gran sensibilidad y que de forma relativa permite la observación de la gravedad de forma rápida y poco costosa lo que ha incrementado la densidad de observaciones. La única limitación que el método gravimétrico tiene es la de disponer de la altitud del punto de observación acorde con la precisión de la medida de gravedad. Es, por tanto, la altitud el parámetro que impide una profusa observación de gravedad sobre la superficie terrestre debido a su elevado coste. Otro factor a tener en cuenta es que la observación en el mar es de inferior precisión. Estas limitaciones han hecho que la Gravimetría, como herramienta geofísica de determinación de la estructura interna de la Tierra, se haya utilizado a nivel local en zonas de posible valor de recursos naturales, y no de forma generalizada para amplias zonas de la Tierra.

Recientemente, la utilización de técnicas de posicionamiento global por satélite (GPS) ha impulsado fuertemente la necesidad de estudios sobre el Geoide que conllevan la determinación de gravedad en puntos de altitud conocida. De esta forma, los estudios con GPS están impulsando también la observación del campo de gravedad, puesto que inversamente podrá utilizarse esta técnica GPS para determinar levantamientos altimétricos.

Por todas estas razones expuestas, la Gravimetría sigue siendo una disciplina geofísica con un gran futuro, ya que con costes relativamente bajos permite conocer el interior de la Tierra en sus capas más exteriores y además ayuda a un mejor entendimiento de la geodesia dinámica.

En España los estudios sobre la determinación de la gravedad comenzaron en 1877 por Barraquer. Es, sin embargo, en el período 1882-1883 cuando Barraquer realizó con cuatro péndulos de inversión Repsold la primera determinación absoluta de gravedad en el Observatorio Astronómico de Madrid. Hacia 1920 se disponía de 93 estaciones

pendulares en toda España y 4 en Portugal que permitieron la realización, por Sans Huelin, de lo que quizá sea el primer estudio de **anomalías aire libre** y **Bouguer** en la península Ibérica (Inglada, 1923). Posteriormente (Inglada, 1927) se publicó el mapa de anomalías isostáticas de una parte de la península Ibérica para el mismo número de observaciones. Las observaciones de gravedad se continuaron hasta llegar a unas 200, aproximadamente, al final de la década de los cuarenta. Sans Huelin y Lozano (1948), con un total de 208 estaciones, estudian para distintas expresiones de la gravedad normal las anomalías de Bouguer de la península Ibérica. El resultado de este trabajo concluye en la gran similitud de las anomalías así obtenidas, siendo las correspondientes al elipsoide de Helmert de 1901 con el que se obtiene la menor anomalía media cuadrática para toda la península. Estos autores presentan los mapas de anomalías Bouguer a escala 1:3.000.000 para las distintas gravedades normales y establecen una interpretación isostática de las anomalías en función de la topografía. Posteriormente, durante los años sesenta, se producen unas campañas de observación relativa con gravímetros que incrementan notablemente el número de observaciones. El objetivo existente detrás de este aumento de observaciones se encuadra dentro de un proyecto consistente en publicar los mapas de anomalías gravimétricas de Bouguer de las distintas provincias del país a escala 1:200.000. Así pueden citarse los trabajos de Lozano (1963 a, b, c, d, 1966) y las publicaciones de Instituto Geográfico y Catastral (IGC) (1968, 1969, 1970) en los que se incluyen las observaciones realizadas y los mapas de anomalías de Bouguer para varias provincias españolas. Lozano (1961) publica el mapa de la corrección topo-isostática de la España peninsular según la teoría de Airy-Heiskanen con un espesor de corteza de 20 y 30 km. Estas correcciones de las zonas próximas ($A - O_2$) se complementan con las correspondientes a las zonas alejadas ya que están publicadas por los organismos internacionales de gravimetría. Posteriormente Lozano (1964) realiza un estudio de **Anomalías Aire Libre** y Bouguer-Isostática para la Península Ibérica a escala 1:2.000.000.

Más adelante, debido al espectacular incremento de observaciones realizadas,

se publica el avance de un futuro mapa de anomalías, a escala 2.000.000, en el que se utiliza un número de observaciones un 50 por 100 aproximadamente superior al del anterior estudio publicado en 1964, IGC (1972). En este avance se utilizan 236 valores de gravedad para España y 43 para Portugal del total de datos existentes en el Banco de Datos Gravimétricos en esa fecha. También se utiliza, como gravedad normal, la fórmula de Cassinis, basada en el elipsoide de Hayford, y mediante tablas de conversión se obtienen las anomalías con relación a la gravedad normal del sistema 1967, teniendo en cuenta la nueva observación de la gravedad en el Datum fundamental de Postdam.

Debido a que el número de observaciones siguió aumentando de forma continua durante la década de los años setenta, el Instituto Geográfico Nacional, realizó un avance del Mapa Gravimétrico (IGC, 1972) y posteriormente en la VII Reunión de la Comisión Internacional de Gravimetría celebrada en París se presentó (IGC, 1974), un adelanto, correspondiente al cuarto noroccidental de la Península Ibérica, del futuro mapa de anomalías Bouguer a escala 1:1.000.000 en cuatro hojas. En esta publicación se anuncia también el proyecto de edición de los mapas gravimétricos a escala 1:500.000 en nueve hojas, que cubrirían todo el territorio peninsular, que no ha llegado a ultimarse.

Establecida la Red Gravimétrica Fundamental en 1973, se produce una importante densificación de observaciones en todo el territorio. Con motivo de la II Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica se presentan los Mapas de Anomalías Aire Libre y Bouguer sobre un estudio realizado de 2621 estaciones de gravedad y utilizando la fórmula de gravedad normal de 1967 (Alonso San Millán, 1978).

La parte del territorio nacional correspondiente a Cataluña se publicó, Casas *et al* (1987), a escala 1:500.000, con los Mapas de Aire Libre y Bouguer pero esta vez con corrección topográfica, lo que supone una gran innovación con relación a los trabajos anteriormente mencionados. En este último estudio se utiliza la gravedad normal del sistema 1967, y la influencia de la topografía hasta los 167 Km. de la estación. Además, estos autores utilizan, como comentaremos más adelante, una base de datos ampliada con nuevas observaciones hasta un total de 2.366 estaciones para Cataluña.

Bonini *et al* (1973) modelizan a partir de mapas-síntesis las anomalías Bouguer de parte del territorio, como es el sur de la Península Ibérica el mar de Alborán y norte de África. Igualmente, Bergamín (1983) publica el Mapa Gravimétrico del Campo de Calatrava (Ciudad Real) o Bergamín y Tejero (1993) estudian la zona NE de la cuenca de Madrid. Este tipo de trabajos tienen generalmente como objetivo el estudio y modelización de estructuras a partir de los mapas gravimétricos.

Abordar una cartografía gravimétrica con corrección por topografía para todo el territorio ha estado supeditado a la disponibilidad de un modelo digital del terreno (MDT). A partir del año 1992 el Instituto Geográfico Nacional dispuso del MDT con ancho de malla de 200 m que ha permitido la realización del estudio que se presenta en este trabajo, consistente en la elaboración de estos nuevos mapas de Anomalías Aire Libre y Bouguer con corrección topográfica de la Península Ibérica y Baleares. Además, se ha procedido a una nueva estructuración del banco de datos gravimétricos, realizando una revisión total de sus parámetros y generando un nuevo banco sobre un soporte informático más accesible. Por último se presentan, además del elipsoide y parámetros asociados utilizados en el estudio, una serie de mapas derivados que junto con el Sistema de Información Geográfico que dispone el IGN es posible una utilización más sencilla y eficaz de esta información. Se presentan a modo de ejemplo para una parte del territorio, esta utilización de la información gravimétrica dentro de su proceso de interpretación integrada de información geodésica y geofísica.

II. Banco de datos gravimétricos

Como se ha descrito en la introducción, el Banco de Datos Gravimétricos (BDG) ha sufrido a lo largo del tiempo múltiples cambios que obedecen fundamentalmente a dos razones: el instrumento de observación (aparatos pendulares o gravímetros) y otra, la posible homogeneización de los datos a partir de la observación de la Red Gravimétrica Fundamental de 1973. A principio de los ochenta se elabora, por parte del IGN, una Base de Datos de señales Gravimétricas (IGN, 1983) que tiene como misión ofrecer al usuario una información total y rápida de

la gravimetría de una determinada zona de investigación. De esta forma se pretende almacenar toda la información existente en los archivos del IGN que haya sido observada por el mismo Instituto o por otras empresas u organismos oficiales que lo hayan ofrecido a este banco nacional.

El considerable avance obtenido en los últimos diez años en el desarrollo de bases de datos, junto con la nueva concepción que el soporte informático ha experimentado en el IGN, aconsejaron la renovación de la base de datos gravimétricos de 1983. Esta nueva base, denominada GRAVIMET, ha sido desarrollado

por F. Bendala (comunicación personal) con el fin de actualizar la anteriormente existente de 1983 utilizando para su gestión un soporte informático disponible en el mercado, (Microsoft Access). Para definir los parámetros a almacenar se ha tenido en cuenta la base gravimétrica existente con anterioridad, así como los proporcionados en la base disponible por el Bureau International de Gravimetria. Con toda esta información se presentan en la tabla 1, los campos y tipos de datos que almacena la base GRA VIMET.

TABLA I				
NUMERO DE CAMPO	NOMBRE DEL CAMPO	TIPO DE DATOS	TAMAÑO EN BYTES	SIGNIFICADO
1	HojaMTN 50	Numérico	4	<i>Hoja del Mapa 1:50.000</i>
2	CuartoMTN 25	Numérico	1	<i>Cuarto del Mapa 1:25.000</i>
3	NumEst	Numérico	2	<i>Número de Estación dentro de la Hoja del Mapa 1:50.000</i>
4	LonG	Numérico	8	<i>Longitud en Grados</i>
5	LatG	Numérico	8	<i>Latitud en Grados</i>
6	Altitud	Numérico	4	<i>Altitud en metros</i>
7	GraObs	Numérico	8	<i>Gravedad en miligales</i>
8	FechaObs	Fecha	8	<i>Fecha de la Observación</i>
9	ErrorMed	Numérico	8	<i>E.M.C. de la precisión de la Gravedad en miligales</i>
10	CodAlt	Numérico	1	<i>Código Altimétrico</i>
11	CodPla	Numérico	1	<i>Código Planimétrico</i>
12	CodProPa	Numérico	1	<i>Código de Provincia o País</i>
13	TipoRed	Numérico	1	<i>Tipo o categoría de la Red</i>
14	Nombre	Texto	50	<i>Nombre de la estación</i>
15	IdGRa	Numérico	1	<i>Identificador del Gravímetro empleado</i>
16	OrgPro	Numérico	1	<i>Organismo de Procedencia</i>
17	CorrTopo	Numérico	8	<i>Corrección Topográfica. De 300 m a 167 km</i>

Los datos que figuran en GRAVIMET corresponden a observaciones realizadas por el IGN desde 1960 y que han podido homogeneizarse con la observación y ajuste de la Red Gravimétrica Fundamental de España de 1973. Además, se han añadido los datos pertenecientes al Instituto Portugués de Geografía y Catastro, así como aquellos provenientes del Proyecto Hispano-Francés ECORS, de la Universidad de Cantabria, y del Bureau Gravimétrico Internacional. El total de registros, a Diciembre de 1995, es de 32.976. Con objeto de visualizar como ha sido la obtención por el IGN de datos gravimétricos en el período 1960-1995, se ha representado en la **Figura 1** el histograma correspondiente. Como puede observarse, hay un máximo muy acusado en los años 72-73 que se corresponde

con la realización de la *red* fundamental] y luego se mantiene estable hasta llegar al último período, 84-92, en el que frecuentemente se interrumpe la observación gravimétrica. A continuación existe un máximo que corresponde a las observaciones en Portugal, quedando en un nivel de muy baja observación la *red* gravimétrica española. La nueva *red* de nivelación de alta precisión que se piensa acometer en España, junto con la creciente necesidad de determinación de gravedad en los estudios de GPS, auguran un cambio drástico en dicha tendencia.

En la **Figura 2** se han representado las estaciones gravimétricas existentes en la base GRAVIMET a diciembre de 1995, con

distinto símbolo según se trate de observaciones realizadas por el propio IGN o por otros organismos nacionales o extranjeros. Puede apreciarse que la mitad sur de Portugal dispone de una densidad de observaciones mayor que la parte norte, circunstancia que se está procediendo en la actualidad a corregir. También pueden observarse determinadas líneas en las que la concentración de datos es muy superior a la media y que se corresponden con líneas de nivelación. Por lo demás, la densidad de observaciones es bastante homogénea para todo el territorio peninsular de España y para las Islas Baleares.

En la **Figura 3**, se observa la Red Fundamental de Gravimetría de España de 1973, a la que se han añadido los valores correspondientes a Portugal, estableciéndose para la parte española qué estaciones están unidas a la *red* internacional así como el tipo de itinerario de enlace. Esta *red*, debido a la fecha de observación, es necesario reobservarla e incluir las observaciones absolutas de gravedad realizadas en este intervalo de tiempo.

Con objeto de que todas las observaciones que se realicen con distintos gravímetros puedan ser integradas, el Instituto

Geográfico Nacional ha diseñado una línea de calibración que permite la observación de puntos de distinta altitud (diferencia máxima de cotas de 1200 m), así como de distinta latitud. Esta línea junto con el perfil topográfico se ha representado en la **Figura 4** y uno los puntos de Santander-Málaga. Una lista de las estaciones que comprende dicha línea se presenta en la Tabla n, en la que se presentan los valores adoptados para la gravedad en todos los puntos de la línea.

III. Modelo Digital del Terreno.

La disponibilidad del MDT con malla de 200 m. ha permitido abordar las correcciones topográficas que, a nivel de todo el país, no se podían realizar para una cartografía a escala 1:1.000.000. Este tipo de correcciones se ha venido haciendo exclusivamente en investigaciones de recursos naturales. Particularmente en España, hasta época muy reciente, al no existir un MDT de todo el territorio, no ha podido realizarse una corrección topo gráfica a las observaciones gravimétricas. Sin embargo se han hecho cálculos aproximados mediante la digitización de

la cartografía existente con el fin de corregir por topografía. Así, Casas et al (1987) utilizando cartografía a escalas 1:25.000 y 1:50.000 para la situación de las estaciones y las altitudes observadas con precisiones que van desde ± 1 cm. en los puntos de la *red* de Nivelación de Alta Precisión hasta ± 5 m. en aquellas estaciones observadas con altímetro gravimétrico de precisión.

El MDT 200 existente para todo el territorio nacional, que ha servido de base para nuestro estudio, se ha complementado con la información concerniente a áreas exteriores al territorio de tal forma que se ha formado un MDT200 para toda la Península Ibérica y áreas marinas y terrestres adyacentes. En particular se ha dispuesto de la siguiente información:

- MDT 200 del Instituto Geográfico Nacional de España.
- MDT obtenido del Defense Mapping Agency de los Estados Unidos para completar la zona correspondiente a Portugal.
- MDT obtenido del Instituto Geográfico Nacional de Francia para la parte francesa del Pirineo.
- MDT generado a partir de las cartas náuticas del Instituto Hidrográfico de la Marina de España, que complementa la parte marina hasta los 167 Km. de la costa con un ancho de malla de 5 km.

La unión de todos estos MDT se muestra en la **Figuras 5 y 6** conformando un modelo completo para uso en cualquier punto de la península Ibérica y las islas Baleares, según el tipo de medida necesario.

La corrección topográfica de las observaciones gravimétricas reducidas de la meseta de Bouguer se ha llevado a cabo hasta los 167 Km. de distancia de cada estación, usando este MDT descrito anteriormente, según los siguiente criterios:

DISTANCIA	METODO DE CORRECCION	MDT (ancho malla)
0 - 300 m	ninguna	—
300 m - 20 km	Klinge (1980) con algoritmo de Nagy (1965)	200 m
20 km-167 km	Plouff (1977) adaptado	5 km

IV. Anomalías del Campo de Gravedad

Las desviaciones de la gravedad observada sobre la superficie de la tierra, (reducida al nivel del geode y con la corrección topográfica correspondiente), en relación a la teórica, del elipsoide de referencia, son de especial interés tanto en geodesia como en

geofísica. Entre las expresiones para la gravedad sobre el elipsoide se ha considerado la correspondiente al Geodetic Reference System 1980 (GRS 80), Moritz (1984), en el cual se introduce un elipsoide de nivel geocéntrico cuyos parámetros son los siguientes:

TABLA II
Estaciones de la línea de calibración Santander-Málaga

Nombre	Longitud	Latitud	Altitud	Gravedad
SANTANDER B	-3° 48' 24,0"	43° 27' 48,0"	5,00	980497,37
PARBAYON	-3° 53' 28,2"	43° 22' 13,2"	30,00	980475,27
PUNTEVIESGO	-3° 57' 54,0"	43° 17' 58,0"	71,00	980446,79
PRASES	-3° 56' 50,0"	43° 14' 46,0"	140,00	980420,78
ALCEDA	-3° 54' 59,0"	43° 11' 33,0"	176,00	980398,23
SEL CARRERA	-3° 55' 28,0"	43° 08' 36,0"	537,00	980318,69
LOS PANDOS	-3° 54' 10,0"	43° 06' 21,0"	340,00	980339,35
BAR ESCUDO	-3° 53' 08,0"	43° 03' 54,0"	800,00	980251,94
CORCONTE	-3° 53' 40,0"	43° 02' 21,0"	847,00	980234,25
CILLERUELO	-3° 50' 51,0"	42° 58' 22,0"	850,00	980203,37
ESCALADA	-3° 46' 41,0"	42° 48' 46,0"	676,00	980215,20
TUBILLA	-3° 48' 12,0"	42° 42' 32,0"	777,00	980189,79
QUINTANILLA S.	-3° 42' 49,0"	42° 34' 06,0"	965,00	980139,63
BURGOS B	-3° 42' 30,0"	43° 20' 48,0"	854,50	980140,41
LERMA	-3° 45' 33,0"	42° 01' 38,0"	849,00	980109,23
ARANDA B	-3° 41' 42,0"	41° 40' 12,0"	790,00	980070,75
HONRUBIA	-3° 42' 18,0"	41° 30' 39,0"	997,00	980035,66
CARABIAS	-3° 40' 24,0"	41° 26' 32,0"	1.126,00	980007,30
CEREZO ABAJO	-3° 35' 35,0"	41° 13' 04,0"	1.046,40	979976,05
SOMOSIERRA	-3° 34' 51,0"	41° 08' 04,0"	1.444,00	979892,55
ROBREGORDO	-3° 35' 25,0"	41° 06' 27,0"	1.290,00	979919,50
GANDULLAS	-3° 36' 07,0"	41° 00' 46,0"	1.007,00	979964,73
LOZOYUELA	-3° 37' 01,0"	40° 55' 43,0"	1.028,00	979938,39
EL MOLAR	-3° 34' 54,0"	40° 44' 02,0"	817,00	979965,08
MADRID (IGN)	-3° 42' 36,0"	40° 26' 42,0"	690,70	979955,61
PINTO	-3° 42' 36,0"	40° 14' 34,2"	607,30	979979,54
OCAÑA	-3° 29' 12,0"	39° 57' 55,0"	730,80	979936,62
DOSBARRIOS	-3° 28' 24,0"	39° 52' 56,0"	710,10	979944,77
TEMBLEQUE	-3° 30' 12,0"	39° 41' 50,0"	635,10	979964,97
MADRIDEJOS	-3° 31' 49,0"	39° 28' 06,0"	688,60	979919,29
VILLARTA	-3° 25' 31,0"	39° 14' 21,0"	630,00	979920,93
MANZANARES B	-3° 22' 18,0"	39° 00' 18,0"	657,00	979903,59
VALDEPEÑAS	-3° 23' 49,0"	38° 45' 47,0"	700,00	979874,55
ALMURADIEL	-3° 30' 04,0"	38° 30' 52,0"	798,50	979847,36
LA CAROLINA	-3° 36' 44,0"	38° 16' 34,0"	606,00	979860,80
GUARROMAN	-3° 41' 08,0"	38° 10' 57,0"	349,50	979901,86
BAILEN B	-3° 46' 30,0"	38° 05' 54,0"	360,00	979886,70
VILLARGORDO	-3° 46' 57,0"	37° 54' 54,0"	295,00	979867,55
JAEN	-3° 47' 28,0"	37° 46' 53,0"	489,40	979802,17
CORTIJO ATOCH	-3° 40' 08,0"	37° 43' 03,0"	535,00	979769,45
CASILLA	-3° 36' 14,0"	37° 37' 20,0"	705,00	979712,80
LA NAVA	-3° 34' 08,0"	37° 24' 20,0"	875,00	979665,39
GRANADA B	-3° 36' 18,0"	37° 11' 12,0"	700,00	979653,05
PADUL	-3° 37' 38,0"	37° 01' 23,0"	745,00	979662,30
DURCAL	-3° 33' 59,0"	36° 59' 16,0"	782,00	979654,62
LECRIN-TALARA	-3° 33' 03,0"	36° 56' 54,0"	705,00	979677,19
VENTA-ANGUST.	-3° 31' 44,0"	36° 55' 05,0"	540,00	979709,18
VELEZ DE BENV.	-3° 30' 57,0"	36° 49' 57,0"	171,00	979814,88
GOPOCHAGA	-3° 30' 19,0"	36° 47' 22,0"	275,00	979820,98
MOTRIL	-3° 31' 16,0"	36° 45' 06,0"	75,00	979882,76
NERJA	-3° 52' 36,0"	36° 44' 41,0"	21,40	979913,92
LOS LAURELES	-4° 10' 60,0"	36° 42' 56,0"	1,60	979955,33
MALAGA B	-4° 23' 36,0"	36° 43' 36,0"	60,30	979900,17

NOTA: Las estaciones con denominación «B», también pertenecen a la Base Gravimétrica Fundamental.

Radio ecuatorial terrestre:

$$a = 6378137 \text{ m}$$

Constante geocéntrica de gravedad de la Tierra incluyendo la atmósfera:

$$GM = 398\,600.5 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ S}^{-2}$$

Factor dinámico de forma de la tierra sin la deformación permanente de mareas:

$$J_2 = 1082.63 \cdot 10^{-6}$$

Velocidad angular de rotación de la Tierra:

$$\omega = 7.292115 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$$

Con estos parámetros la expresión de gravedad normal como función de la latitud geocéntrica es:

$$\gamma_0 = \gamma_e (1 + \beta \sin^2 \varphi - \beta_1 \sin^2 2\varphi)$$

donde γ_e , β y β_1 son la gravedad normal en el ecuador, el aplanamiento gravimétrico y el factor que depende del aplanamiento geométrico f y de la relación entre la fuerza centrífuga y la aceleración en el ecuador.

Los valores para GRS 80 son:

$$\gamma_e = 9.780.327$$

$$\beta = 0.0053024$$

$$\beta_1 = 0.0000058$$

$$f = 1:298.257$$

En esta expresión, el valor de la gravedad γ_0 sobre el elipsoide contiene la influencia de la masa atmosférica condensada sobre el elipsoide. La influencia de la atmósfera es del orden de $8.7 \mu\text{ms}^{-2}$ (Torge, 1989).

Anomalía Aire Libre o Faye

La anomalía aire libre

$$\Delta g_{AL} = g_{Obs.} - (\gamma_0 - 0.3086 h) \text{ mgal}$$

corresponde con la diferencia entre la gravedad observada y la correspondiente teórica del elipsoide transportada a la altitud del punto de observación. Por tanto, la reducción aire libre trata de compensar las variaciones en la distancia del punto de observación al centro de atracción de la Tierra.

Las anomalías aire libre tienen una fuerte dependencia de la altitud del punto y para áreas restringidas puede expresarse:

$$\Delta g_{AL} = a + bh$$

donde el coeficiente a depende de la distribución de masas en la corteza y b es una función de la densidad media de las masas topográficas, siendo representativo un valor promedio de $b = 1 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-2}$, Torge (1989).

Anomalía Bouguer

El objetivo último de la reducción de Bouguer es eliminar los efectos de las masas topo gráficas existentes entre el elipsoide y la superficie de la tierra donde se encuentra la estación. Para realizar esta reducción se considera, en primera aproximación, el efecto de la placa o lámina de Bouguer de extensión lateral infinita y densidad constante y cuya altura es la correspondiente a la estación. Con el efecto de aire libre incluido, la reducción Bouguer completa queda

$$\Delta g_B = g_{Obs} - (\gamma_0 - 0.1967 h) \text{ mgals}$$

Sin embargo, a esta reducción de Bouguer es necesario corregirla por el efecto de la topografía, en exceso o defecto de la reducción de lamina de Bouguer. Este efecto, en zonas de relieve muy pronunciado, puede ser bastante importante por lo que su consideración es a veces totalmente necesaria. Su realización práctica inicial se debe a Hammer (1939) que evalúa la atracción de prismas en círculos concéntricos alrededor de la estación. Ésta corrección se ha calculado hasta época reciente de forma manual mediante la utilización de plantillas superponibles a mapas topográficos. Sin embargo, la digitalización de la cartografía ha permitido abordar de forma numérica los efectos de la topografía.

El algoritmo de Nagy (1966), utilizado para la corrección topográfica en el rango 300 m a 20 Km., se basa en la descomposición de cualquier configuración topo gráfica alrededor de un punto de observación como suma de prismas rectos de varios tamaños y densidades. En cambio el algoritmo utilizado por Plouff

(1977) que hemos adaptado para el rango de distancias 20 a 167 Km. se basa en la consideración de prismas en coordenadas geográficas, lo que proporciona más versatilidad. Además, dado el rango de distancias a que puede ser utilizado, se puede corregir por la curvatura terrestre. En este trabajo se ha considerado una densidad estándar de 2.67 gr./cm³.

V. Representación cartográfica de las anomalías gravimétricas

La utilización de las nuevas técnicas de representación cartográfica permiten obtener un mayor rendimiento, en cuanto a implementación se refiere, de los mapas de anomalías aire libre y Bouguer. La comparación de estos mapas con los correspondientes de geología ó fallas sobre un modelo digital del terreno permiten obtener unas conclusiones de forma sencilla, circunstancia que antes no era posible.

Para el dibujo de los mapas con el programa SURFER, primero se generaron dos mallas, una para la Península y otra para Baleares de ancho 5 Km. por el método Kriging con un radio de búsqueda de 100 km., a partir de éstas se generaron otras de ancho de 1 Km. insertando 4 nodos con el algoritmo spline suavizado; esto se aplicó en los dos mapas. Las isolíneas se generaron con el mismo programa, aunque la edición cartográfica definitiva se hizo mediante el programa Microstation cuyo resultado puede verse en los dos mapas a escala 1: 1.000.000 adjuntos a esta memoria.

La equidistancia entre isolíneas es de 2 mgals y una variación de color de acuerdo con una escala que se indica en los mapas. Con el objeto de facilitar la interpretación de los valores de anomalía se han trazado una serie de líneas maestras cada 10 mgals y además se han representado los máximos y mínimos relativos con los símbolos + y - al objeto de poder deducir de forma rápida e inequívoca el valor de las isolíneas de la anomalía a estudiar.

Aunque las estaciones gravimétricas próximas a la costa han sido corregidas por la topografía del fondo marino, las anomalías deducidas solo pueden extrapolarse en tierra, puesto que no se ha considerado ningún valor de gravedad en el mar.

En el caso de Cataluña, se dispone de una mayor densificación de estaciones gravimétricas, Casas *et al* (1987). En estas

circunstancias se planteó la alternativa de su utilización en el mapa general de la península Ibérica. Su inclusión podría llevar a un gran desequilibrio en cuanto al nivel de información con el resto del país y con Portugal, mientras que no utilizarla parecería ignorar esta información adicional. Para comparar estas alternativas se realizó una prueba, en la que utilizando GRAVIMET por una parte y por otra la misma base aumentada con la información adicional para Cataluña, se ha representado la anomalía de Bouguer (Figuras 7 y 8), pudiendo observarse gráficamente las diferencias. En la zona costera, tanto el valor de la anomalía como la tendencia general de las isolíneas son muy parecidas, por lo que apenas existe diferencia. En cambio, en la zona del Pirineo sí pueden observarse diferencias en la configuración de las isoanómalas, aunque no en los valores medios de la anomalía. Al objeto de no realzar en más estas diferencias, si comparamos con la parte norte de Portugal, hemos optado por no considerar la información adicional que supondría la inclusión de la densificación de estaciones gravimétricas para Cataluña.

Para poder realizar una comparación entre el MDT y el mapa de anomalías de Bouguer, se ha representado en la Figura 9, la perspectiva isométrica de las anomalías de Bouguer. Se pone de manifiesto cómo la anomalía Bouguer representa la función simétrica de la topografía.

Por último, cabe destacar que esta nueva cartografía gravimétrica, en el caso de anomalías Bouguer, al contar con la corrección topográfica, permite un análisis e interpretación mas detallado. Con objeto de poner de manifiesto las diferencias introducidas por la influencia de la corrección por topografía se ha realizado, a lo largo de un perfil que se muestra en la Figura 10, una comparación de la anomalía gravimétrica con corrección topográfica y sin ella para el actual banco GRAVIMET. Puede observarse que las grandes diferencias en anomalías no están en función del valor de la topografía, sino en las diferencias relativas en la topografía cercana. Asimismo, se ha representado la anomalía correspondiente al mapa de anomalías Bouguer de 1976, para mostrar las diferencias existentes, tanto con el nuevo mapa con corrección topográfica como con el obtenido sin aplicar dicha

corrección. La comparación ha de hacerse por supuesto con la versión actual, sin corrección topo gráfica, y las diferencias mostrarán la influencia tanto en el banco de datos utilizado, como en las técnicas tanto de obtención de anomalía (elección de elipsoide de referencia) como del método de curvado. Puede observarse que existen diferencias muy marcadas y que en algunos casos son del orden 30 40 mgals, lo que supone una profunda diferencia a la hora de proceder a una interpretación. Sin embargo, como cabía esperar, la anomalía de gran longitud de onda (anomalía regional) es prácticamente inalterable.

Como se ha indicado anteriormente la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con cartografía digital ha supuesto un considerable avance en la interpretación en Geofísica.

Como ejemplo se muestra en la **Figura 11** una salida gráfica de cuatro capas de información de una parte del territorio. Esta información corresponde en la **Figura II.a** al mapa gravimétrico de anomalías Bouguer de la zona, obtenido en este trabajo. Puede apreciarse la gran cantidad de información que presenta con un fuerte contraste de anomalías. En la **Figura 11.b**, se presenta para la misma zona el mapa anomalías magnéticas obtenido a partir del estudio aeromagnético de España, Sotas *et al* (1991).

De forma similar se observan núcleos de anomalías positivas y negativas ya interpretados en función de la tectónica, Mezcuca *et al* (1992). En la **figura II.c** se presenta la parte del Mapa Sismotectónico de España publicado por el IGN (Grupo de Trabajo Mapa Sismotectónico, 1992) elaborado por G. Pascual, correspondiente a la zona en el que se representan los terrenos, fallas cabalgamientos y lineaciones aeromagnéticas. Por último, en la **Figura II.d** se presenta una visión del relieve con iluminación obtenida a partir del MDT 200, en el que se han incluido las principales fallas cartografiadas.

Es obvio que esta información, tratada por separado, impide establecer las posibles correlaciones entre las estructuras geológicas y las anomalías de los campos potenciales. Sin embargo, su tratamiento en un SIG permite una integración de la información geofísica, como es el estudio gravimétrico que se presenta con otros tipos de información a fin de poder correlacionar los accidentes geológicos y su respuesta geofísica en superficie.

Bibliografía

- Alonso San Millán (1978)
Mapas Gravimétricos (*preprint*). II pp., 2 mapas. *Memorias de la Comisión Nacional de Geodesia y Geofísica*. II Asamblea Nacional.
- Bergamín, J. F. (1983).
Mapa gravimétrico del Campo de Calatrava (Ciudad Real). *Revista de Materiales y Procesos Geológicos*. Vol. 4. 185-202
- Bergamín, J. F., Y Tejero, R. (1993).
Gravity Map of the NE zone of the Madrid basin: Contribution of the Knowledge of the deep structure of the zone, en Iberian Lithosphere heterogeneity and anisotropy. Ed. Mezcuca, J., y Carreño, E., Instituto Geográfico Nacional. *Monografía* núm. 10.285-297.
- Bonini, W. E.; Loomis, T. P., Y Robertson J. D. (1973).
Gravity anomalies, ultramaphic intrusions and the tectonics of the region around the strait of Gibraltar. *Journ. Geophys. Res.* 78, 1372-1382.
- Casas, A.; Torne, M., y Banda, E. (1978)
Mapa gravimétrico de Catalunya. 1:500.000. Servei Geologic de Catalunya, 135 pp. Y I mapa.
- Grupo de Trabajo Mapa Sismotectónico (1992)
Análisis Sismotectónico de la Península Ibérica, Baleares y Canarias. Instituto Geográfico Nacional. *Publicación Técnica* núm. 26, 43 pp. Y I mapa.
- Hammer, S. (1939)
Terrain corrections for gravimeter stations. *Geophysics*. 4, 184-194.
- Inglada, V. (1923)
Las observaciones gravimétricas. Instituto Geográfico y Catastral. 568 pp.
- Inglada, V. (1927)
Nota acerca de las isoanomalías de la gravedad en las regiones central y meridional de España. Instituto Geográfico y Catastral, 15 pp. Y I mapa.
- Instituto Geográfico y Catastral (1968).

- Mapa gravimétrico de la provincia de Santander. Instituto Geográfico y Catastral. 36 pp. y 2 mapas.
- Instituto Geográfico Catastral (1969).
Mapas gravimétricos de las provincias de Álava, Guipúzcoa y Vizcaya.. 47 pp. Y 3 mapas.
- Instituto Geográfico Catastral(1970).
Mapa gravimétrico de la provincia de Ciudad Real. 66 pp. y 1 mapa.
- Instituto Geográfico Catastral(1972).
Avance del mapa gravimétrico de la Península Ibérica. 30 pp. y 3 mapas.
- Instituto Geográfico Catastral (1974).
Memoria gravimétrica española. 8 pp. y 2 mapas.
- Instituto Geográfico Nacional (1983).
Base de datos de señales gravimétricas. Memoria interna. III pp.
- Klingelé, E. (1980).
A new method for Near-Topographic Correction in Gravity Surveys. *Pageoph*, 119 (2),373-379.
- Lozano, L. (1961).
Mapas para el cálculo de las reducciones topoisostáticas. Instituto Geográfico y Catastral. 5 pp. 2 mapas.
- Lozano(1963 a).
La reducción Bouguer-Isostáticas. *Revista de Geofísica*. Año XXII, núm. 88, 275-283.
- Lozano(1963, b).
Red de observaciones con gravímetro en la provincia de Burgos. Instituto Geográfico y Catastral.
- Lozano (1963, c)
Red de observaciones con gravímetros en la provincia de Toledo. Instituto Geográfico y Catastral.
- Lozano (1963, d).
Red de observaciones con gravímetro en la provincia de Navarra.. Instituto Geográfico y Catastral. Lozano (1966).
Red de observaciones con gravímetro en la provincia de Palencia.. Instituto Geográfico y Catastral.
- Moritz, H. (1984).
Geodetic Reference System 1980 en the geodesist handbook 1984. Ed, C. C. Tscherning. *Bull. Géod.* 58,338-398.
- Mezcua, J.; Socías, I. y J. Rueda.
Seismicity and magnetic structures in South Spain. Universidad Complutense de Madrid. *V Física de la Tierra*, núm. 4. 135-150.
- Nagy, D. (1966).
The gravitational attraction of a right angular prism. *Geophysics* 31. 367-371.
- Plouff, D. (1977)
A FORTRAN program to compute gravity terrain corrections based on topography digitized on a geographic grid. U. S. Geological Survey. Open. File Rep. 77-535, 45 pp.
- Sans Huelin, G. y Lozano, L. (1948).
Las determinaciones de la gravedad en España y el elipsoide terrestre más aproximado al geoide que se deduce de aquellas. Instituto Geográfico y Catastral. 22 pp. y 4 mapas.
- Socías, I.; Mezcua, J.; Lynam, J., y Del Potro, R. (1991). Interpretation of an aeromagnetic survey of the Spanish mainland. *Earth and Planet. Science Letters*. 105, 55-64.
- Torge, W. (1989).
R. Gravimetry. *De Gruyter*, Berlín. 465 pp.

ANEXO DE FIGURAS

- **FIGURA 1.** Histograma de Observaciones gravimétricas contenidas en la base GRAVIMET
- **FIGURA 2.** Distribución de las observaciones gravimétricas de la Península Ibérica e Islas Baleares contenidas en la base GRVIMET
- **FIGURA 3.** Red Fundamental de Gravimetría de España (1973) y Portugal
- **FIGURA 4.** Línea de calibración gravimétrica entre Santander y Málaga. Perfil Topográfico correspondiente
- **FIGURA 5.** Vista isométrica del M.D.T. con malla de 200 m.
- **FIGURA 6.** Vista isométrica del M.D.T. con malla de 5 Km.
- **FIGURA 7.** Detalle del mapa de anomalías Bouguer para Cataluña deducido de los datos contenidos en la base GRAVIMET
- **FIGURA 8.** Detalle del mapa de anomalías Bouger para Cataluña deducido de los datos contenidos en la base GRAVIMET mas los realizados expresamente en el Mapa Gravimétrico de Cataluña (Casas et al. 1987)
- **FIGURA 9.** Vistas isométricas de la Península Ibérica e islas Baleares
(a) Anomalías de Bouguer
(b) M.D.T.
- **FIGURA 10.** Perfil comparativo de anomalías según el mapa de Anomalías Bouguer de 1976 y los correspondientes a este trabajo con y sin corrección topográfica.
- **FIGURA 11.** Ejemplo de un tratamiento en SIG de la información gravimétrica con otras geofísicas y geológicas.