

## Prospección gravimétrica en la terminación norte del frente montañoso de las Béticas

José M. Richarte, José A. Peláez, Mario Sánchez Gómez, Antonio J. Gil

*Máster "Geofísica y Meteorología". Departamento de Física. Universidad de Jaén.  
Campus Las Lagunillas s/n, 23071, Jaén.*

[japelaez@ujaen.es](mailto:japelaez@ujaen.es)

### Resumen

Se ha realizado una prospección gravimétrica en una región en el límite más septentrional de la Cordillera Bética, justo al oeste de la ciudad de Jaén. Comprende una superficie aproximada de unos 25 km<sup>2</sup>, en la cual pueden observarse tres conjuntos de materiales litológica y estructuralmente bien diferenciados, representativos del margen sur de la Cuenca alta del Guadalquivir. De norte a sur, estos conjuntos son la denominada Unidad Olistostrómica, margas y conglomerados del Serravaliense-Tortoniense, y por último, las Unidades Prebéticas. Además de establecer la metodología para este tipo de estudios, con este ensayo se buscaba el poder diferenciar los dominios geológicos desde un punto de vista gravimétrico. Los resultados obtenidos, aunque de gran calidad, no han permitido hacer inferencias definitivas al respecto. Se observa, por ejemplo, una neta variación de la anomalía de la gravedad en dirección NW-SE, pero creemos que asociada, en principio, a factores puramente isostáticos. En concreto, al aumento del espesor de la corteza bajo las Cordilleras Béticas, con un mínimo de la anomalía de la gravedad aproximadamente bajo las estribaciones de Sierra Nevada. Posteriores estudios, en donde se densifiquen las medidas y se extienda la zona de estudio, quizás lleguen a mostrar la variación buscada en el caso en que ésta sea significativa.

### Introducción

La prospección gravimétrica, junto a otros tipos de prospecciones (sísmica, magnética, eléctrica, radiométrica, ...), se revela como un método geofísico no intrusivo muy interesante a la hora de obtener información del interior de la Tierra. Con ella se mide la variación espacial del campo gravífico terrestre, siendo sensible a la densidad de los materiales del subsuelo. Es decir, diferencias en la densidad de las rocas producen pequeños cambios en el campo gravífico terrestre que pueden detectarse mediante el uso de un instrumento llamado gravímetro. Pertenece a los llamados métodos pasivos o de campo natural, a diferencia de los métodos activos o de campo artificial, en donde es el propio prospector el que crea el campo, detectándose y midiéndose la distorsión o anomalía que crea la estructura a estudiar sobre éste.

Sus principales aplicaciones geológicas se centran en investigaciones relacionadas con la detección de fallas, y detección de cavidades y discontinuidades entre materiales. Es justo esta última aplicación la que se ha pretendido desarrollar en este estudio. El hecho de que en la zona de interés aparezcan tres diferentes dominios es lo que indujo a realizar una prospección gravimétrica que permitiera correlacionar una posible variación del campo gravífico

terrestre con las discontinuidades en dichos materiales.

También se ha empleado esta metodología en la exploración de combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón), y aunque no con mucha profusión, en la exploración de depósitos minerales no metálicos (arenisca y grava), en la exploración de acuíferos, e incluso en aplicaciones muy concretas de tipo arqueológico.

El proceso que se sigue en este tipo de estudios, tras delimitar la zona de trabajo, es el siguiente. Primero, y como trabajo de gabinete previo, se ha de planificar la medición, es decir, se debe establecer sobre la cartografía de la zona, pudiéndose utilizar para ello fotos aéreas o imágenes de satélite, los puntos de medición e itinerarios que han de seguirse para llegar a estos. Es normal aprovechar las vías de comunicaciones existentes. Se pretende, bien distribuir los puntos de medición inicialmente de forma más o menos uniforme, o bien, densificar las medidas en aquellas zonas que previsiblemente tengan un mayor interés.

Posteriormente se realiza el trabajo propiamente de campo: se accede a cada punto con el gravímetro, con el que se realizarán mediadas relativas de gravedad, las cuales habrán de georreferenciarse. En este caso se ha utilizado la metodología GPS a la hora de proporcionar una mayor precisión que la que se obtiene por métodos clásicos. Aunque no es especialmente importante la precisión en la determinación de las coordenadas planas de los puntos, sí lo es el conocer bien las diferencias relativas en elevación de los puntos de medición.

Finalmente se procesan las medidas tomadas, tanto con el gravímetro como con el GPS. Se calcula la gravedad en cada punto a partir de un valor de gravedad absoluta conocido, se procesan las observaciones GPS a la hora de dar coordenadas precisas, y se procesan los valores de  $g$  para obtener unos valores sólo dependientes de las posibles variaciones de densidad del terreno.

### Marco geológico

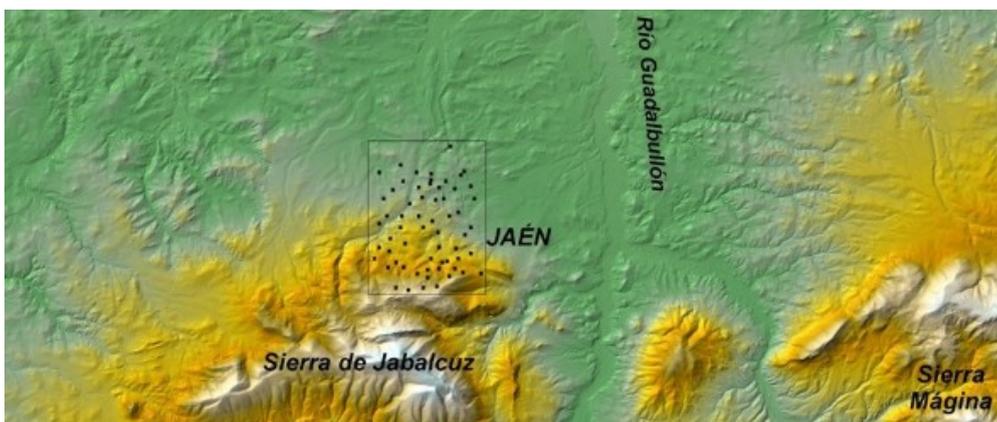
El sector de estudio (**figura 1**) comprende un segmento del límite más septentrional de la Cordillera Bética en su parte central. Este límite forma un frente montañoso producido por el cabalgamiento, hacia el norte o noroeste, de las unidades Subbéticas y Prebéticas sobre los materiales de la Depresión del Guadalquivir. En este sector encontramos diversos materiales representativos del margen sur de la cuenca alta del Guadalquivir. De norte a sur, y estructuralmente de muro a techo, son la denominada Unidad Olistostrómica, margas y conglomerados del Serravaliense-Tortonense, y las Unidades Prebéticas (**figura 2**).

La unidad olistostrómica está formada por un grupo heterogéneo de materiales a modo de megabrecha con fragmentos (cantos) que llegan a alcanzar longitudes kilométricas (olistolitos) embebidos en una matriz margoso-arcillosa de edad Mioceno medio. El espesor de esta unidad tan heterogénea es discutido y probablemente variable, aunque a partir de la cartografía MAGNA, son esperables espesores mínimos de 400 m. Por debajo de ella se encontrarían margas, conglomerados del Mioceno inferior, hasta llegar al basamento mesozoico o hercínico, completando toda la secuencia sedimentaria miocena un mínimo de 800 m que pudiera ser algo mayor en el sector de estudio.

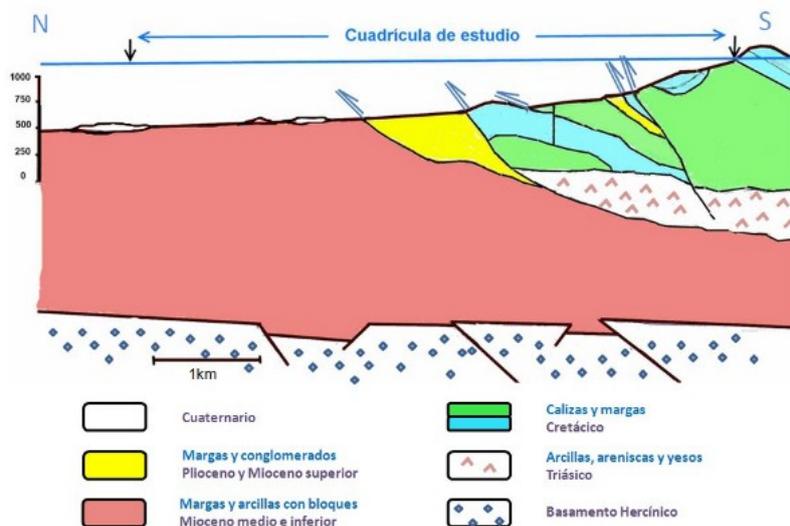
Por encima de este conjunto de materiales, parcialmente cabalgantes, se encuentran las margas y conglomerados del Mioceno medio y superior, que localmente pueden tener cuerpos de calcarenitas o calizas blancas, siempre

subordinados. Estos materiales, que generalmente más al norte aparecen poco perturbados con una disposición subhorizontal, se encuentran aquí deformados por el avance del Frente Prebético que hace que estos cabalguen a su vez sobre la unidad olistostrómica. Esta formación sedimentaria presenta un espesor mínimo de 400-500 m, aunque al ser la formación geológica más superficial, la erosión ha eliminado en muchos lugares la mayor parte de ella. En el sector estudiado los materiales se encuentran parcialmente engrosados por la deformación del frente, pudiéndose estimar junto a éste, un espesor de 500 m.

El Prebético representado en el área corresponde al denominado Prebético Interno, un dominio sedimentario que durante el Mesozoico, aunque formaba parte del margen más próximo al continente, se encontraba relativamente retirado de la costa. Los materiales que forman esta Unidad Prebética son esencialmente carbonatos (calizas y dolomías) y margas, todos ellos de edad Cretácica, por lo que generalmente presentan un grado de compactación y densidad mayor que los pertenecientes al relleno de la Cuenca del Guadalquivir. La potencia estimada del Prebético Interno en el sector supera escasamente el kilómetro, aunque no es descartable que a su base presenten alguna repetición tectónica, o materiales de edad Triásica y naturaleza detrítica y evaporítica (areniscas, arcillas y yesos).



**Figura 1.** Encuadre geográfico aproximado de la zona de estudio. Se muestran los puntos de toma de datos. El modelo digital de elevaciones (10 m x 10 m, Instituto de Cartografía de Andalucía) ha sido el utilizado para realizar la corrección topográfica.



**Figura 2.** Esquema geológico de la zona de estudio. Se observa el corte geológico a lo largo del

meridiano UTM 427000 (Huso 30).

No existen en el sector estudiado grandes espesores de sedimentos cuaternarios que deban ser tenidos en cuenta.

Respecto a la estructura general, representada en el corte geológico, aunque poco estudiada, es una estructura relativamente simple (figura 2). Los materiales prebéticos se superponen sobre los que rellenan la Depresión del Guadalquivir mediante cabalgamiento y fallas inversas de gran ángulo. El frente montañoso, con el consiguiente cambio de pendientes, está delimitado por la terminación norte de la Unidad Prebética, aunque parte de las margas del mioceno superior se encuentran deformadas y apiladas, a modo de pequeño prisma de acreción, que cabalga sobre los sedimentos más antiguos.

### Medidas en campo

La zona de estudio, como se ha indicado, es la que se muestra en la figura 1. Se han realizado un total de 61 medidas válidas, tratando que estuvieran uniformemente distribuidas (aproximadamente 1 medida/0.4 km<sup>2</sup>). La densidad de medidas es adecuada para este tipo de estudios, aunque evidentemente un número más elevado podría aportar una mayor definición espacial al resultado. En cada uno de los puntos se ha realizado una lectura con el gravímetro y se ha estacionado y puesto en operación el equipo GPS.

El gravímetro utilizado ha sido el Gravitón EG Meter™, el cual permite realizar medidas de diferencias de gravedad con una repetibilidad de 0.003 mGal en campo. Es enteramente automático, no necesita corrección instrumental, realiza él mismo la corrección de marea, y proporciona una estimación del error medio cuadrático de la medida. Se le considera el más sensible hoy en día del mercado.

La lectura que proporciona el instrumento es un valor relativo de la gravedad en dicho lugar. Para obtener un valor absoluto de g en cada punto se ha utilizado como referencia el valor conocido de la intensidad de la gravedad en un vértice perteneciente a la Red Gravimétrica Absoluta de Orden Cero. En concreto, el situado en el primer sótano del Centro de Profesorado de la Junta de Andalucía y Ministerio de Educación y Ciencia en Jaén. Es un vértice del tipo 'doble pilar', de profundidad 1.5 m, y en el cual, durante el año 2003 se realizaron medidas precisas de g con un gravímetro de absolutas del tipo FG5 por parte de la Universidad de Jaén y el Instituto Geográfico Nacional. Se obtuvo un valor de g de 9.79743039 m/s<sup>2</sup> ( $\sigma = 1.1 \cdot 10^{-8}$  m/s<sup>2</sup>) (Rodríguez Pujol y Gil, 2006, *V Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*).

Los errores finales en la determinación de g en cada punto han oscilado entre 0.04 y 0.17 mGal (1 mGal = 10<sup>-5</sup> m/s<sup>2</sup>).

El equipo GPS utilizado ha sido el Leica GPS1200™. El equipo consta de una antena GPS con bastón, sujeta por un trípode, y conectada a una controladora. El método de medición utilizado ha sido el llamado estático relativo. Las coordenadas de nuestro equipo portátil se calculan en relación a otro fijo, que recibe señales de la constelación de satélites GPS de forma simultánea, y del cual se conocen sus coordenadas con una alta precisión. En nuestro caso es la antena GPS permanente perteneciente a la Universidad de Jaén, localizada en la terraza del edificio del Colegio Mayor "Domingo Savio", con coordenadas UTM (Huso 30) en el sistema de referencia ED50 (431280.130, 4182760.622), y cota ortométrica 478.072 m. La ventaja de este método es que los errores que se generan son comunes para ambos receptores, por lo que su incidencia al considerar las diferencias de coordenadas se minimiza.

El software utilizado para el procesamiento de los datos GPS ha sido el SKI™ de Leica™. Los errores finales estimados en la determinación de las coordenadas de cada punto son del orden de 2 cm en planimetría y 5 cm en altimetría.

### Procesamiento de los datos de gravedad

Los valores de  $g$  obtenidos en cada uno de los puntos de medición no pueden utilizarse directamente para obtener conclusiones de tipo geodésico o geológico. Han de reducirse, realizando para ello una serie de correcciones. Es decir, se ha de eliminar el efecto en la gravedad medida debido a la diferente altura de cada punto (distancia al geocentro –centro de masas de la Tierra-) y el efecto que genera la topografía. Estas correcciones tienen en cuenta el gradiente vertical de la gravedad cerca de la superficie terrestre, la atracción gravitatoria de la topografía, la diferente aceleración centrífuga en cada punto, debida al giro de La Tierra, y la elipticidad de la figura de ésta (Featherstone and Dentith, 1997, *Comput. Geosc.* **23**, 1063-1070).

La variable que realmente se utiliza a la hora de interpretar cualquier prospección gravimétrica es la llamada anomalía de la gravedad o anomalía Bouguer ( $\Delta g_B$ ), la cual viene dada mediante la expresión

$$\Delta g_B = g - \gamma + \delta g_F - \delta g_B + \delta g_T$$

en donde  $g$  es la gravedad medida,  $\gamma$  la llamada gravedad normal,  $\delta g_F$  la corrección aire-libre,  $\delta g_B$  la corrección por placa Bouguer, y  $\delta g_T$  la corrección topográfica. Esta variable, la anomalía de la gravedad, sí está exenta de los anteriormente citados efectos, y sólo es función de la variación de densidad de los materiales del subsuelo.

La gravedad normal se calcula mediante la llamada fórmula de Somigliana (Moritz, 1980, *Bull. Géod.* **54**, 395-405). Con este término se elimina la influencia en la medida de la gravedad que tiene el hecho de que cada punto se encuentra a diferente latitud (aceleración centrífuga y elipticidad de la Tierra). Los parámetros introducidos en la expresión son los del sistema geodésico de referencia WGS84, utilizado en todos los casos a lo largo de este trabajo. La latitud del lugar, única variable independiente en la fórmula de Somigliana, ha sido la obtenida mediante la observación GPS.

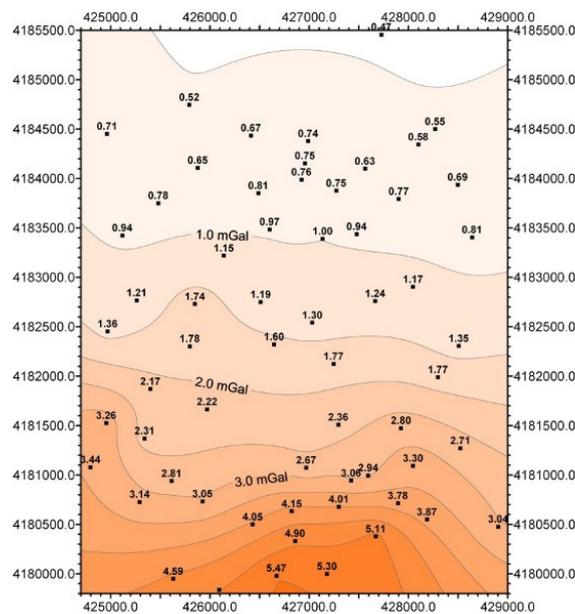
La expresión para la corrección aire-libre utilizada ha sido la llamada fórmula de segundo orden (Heiskanen and Moritz, 1980, *Physical Geodesy*, W.H. Freeman ed.), que considera la Tierra con forma de elipsoide de referencia. Con esta corrección se reducen todas las medidas a una misma superficie de referencia, en nuestro caso al geoide, eliminando el efecto en la gravedad debido a la diferente altura de cada punto. Las variables independientes que aparecen en la citada expresión son la gravedad normal, ya comentada anteriormente, y la cota ortométrica del punto. La cota proporcionada por la observación GPS es la cota elipsoidal del punto en cuestión, por lo tanto, se necesita conocer la ondulación del geoide (distancia elipsoide de referencia - geoide) para obtener la ortométrica. En dicha transformación se ha utilizado un geoide calculado específicamente para Andalucía (Lacy *et al.*, *Stud. Geophys. Geod.* **45**, 55-66). La ondulación del geoide en la zona oscila entre 50.1 y 50.3 m.

La corrección por placa Bouguer elimina el efecto de la capa de materiales entre el punto de medición y la superficie de referencia elegida. Es usual considerar, tal y como se ha hecho en este trabajo, que esta capa es una placa infinita (placa Bouguer) de espesor igual a la distancia entre el punto y la

superficie de referencia, en nuestro caso, la cota ortométrica. La fórmula utilizada (Heiskanen and Moritz, 1980) sólo tiene como variable independiente dicha cota, y por tanto, se han utilizado los mismos valores que en el caso de la corrección aire-libre. La densidad de los materiales elegida para hacer esta corrección ha sido el típico valor que se asume como densidad media de la corteza terrestre, 2670 kg/m<sup>3</sup>.

Finalmente, la corrección topográfica tiene en cuenta lo que se aleja la topografía real de la zona de una placa Bouguer, es decir, el efecto que tienen las elevaciones o valles (topografía residual) en las inmediaciones del punto de medición en el valor medido de g. Aunque no presenta valores importantes en comparación con las anteriores correcciones, siendo a menudo despreciada en zonas que no son muy accidentadas, en este caso, debido a la escala del trabajo, la resolución que se persigue, y la topografía de la zona, sí ha sido tenida en cuenta.

Se ha desarrollado un software *ad hoc* con el que se ha calculado, a partir de un modelo digital del terreno dado, la influencia de la topografía en cada punto. El modelo digital de elevaciones de partida (figura 1) ha sido el del Instituto de Cartografía de Andalucía, de resolución 10 m. El software calcula la influencia de la topografía hasta aproximadamente unos 10 km de distancia en los alrededores de cada punto. El resultado obtenido para la zona de estudio se observa en la **figura 3**.

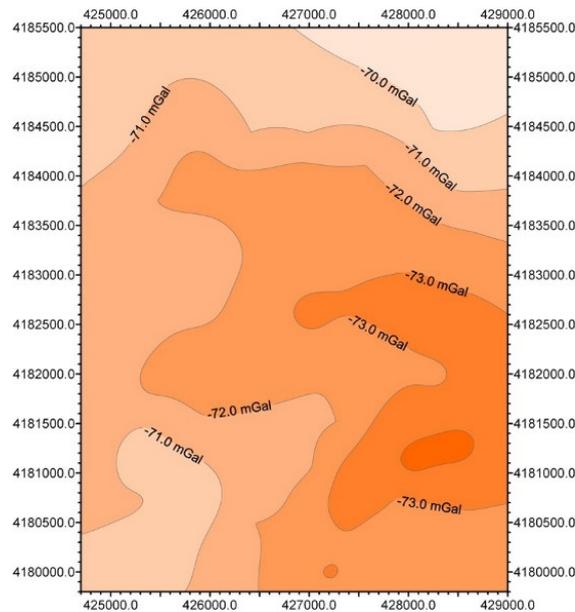


**Figura 3.** Valores de la corrección topográfica en la zona de estudio. Se representan los valores individuales y las isólinas.

Se observan valores que oscilan entre los 0.5 mGal, en la parte norte, con una topografía suave y más alejada de las elevaciones del terreno, y los 5.5 mGal, al sur, con una topografía más abrupta, en concreto, las estribaciones de la Sierra de Jabalcuz. Los valores de corrección topográfica, como la topografía, presenta de forma neta sólo variación N-S. El resultado confirma el hecho de que en estudios de estas características esta corrección no puede despreciarse.

## Resultados y discusión

Los valores finales de anomalía de la gravedad calculados se muestran en la **figura 4**. Se observa una variación de la anomalía entre  $-69.4$  mGal, en el extremo NE de la zona, y  $-74.2$  mGal, en un mínimo local que se observa en el SE. Los valores obtenidos muestran claramente dos tendencias: una lenta variación en dirección NW-SE combinada con una más rápida prácticamente perpendicular a la anterior.

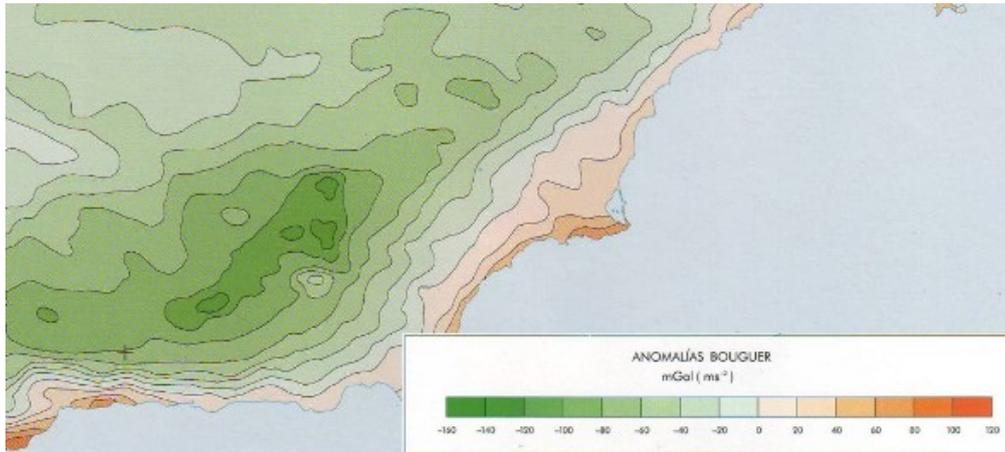


**Figura 4.** Anomalía de la gravedad calculada en la zona de estudio, incluyendo la corrección topográfica.

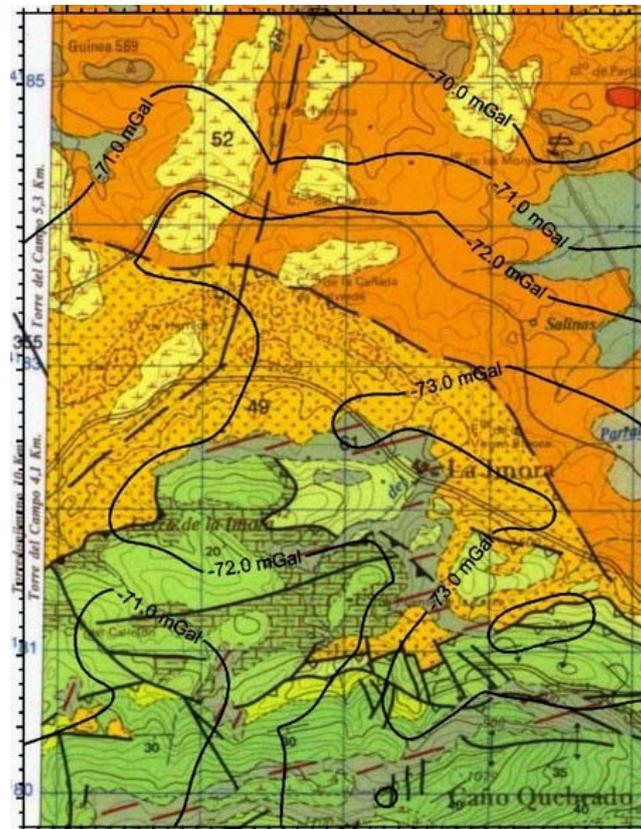
La tendencia en dirección NW-SE se corresponde con lo observado y esperado en las Béticas (**figura 5**). El engrosamiento de la corteza bajo las Béticas, llegando a ser de hasta 35/40 km, sabemos que se corresponde con valores mínimos de anomalía de la gravedad de hasta  $-140/-160$  mGal. Conforme nos desplazamos hacia el NW, hacia la Depresión del Guadalquivir, la corteza va adelgazando y los valores de anomalía Bouguer tienden a aumentar. Es un fenómeno relacionado exclusivamente con el fenómeno de la isostasia que se llega a observar incluso en este estudio, en donde el reducido tamaño de la zona no parecía el idóneo como para resaltar o hacer notar este efecto.

La tendencia perpendicular a ésta, de dirección NE-SW, no podemos explicarla netamente con los datos obtenidos, especialmente debido a lo restringido de la zona de estudio. Evidentemente ha de deberse a una estructura localizada, y no a un efecto regional.

Observando la **figura 6**, no parece que puedan correlacionarse los valores de anomalía Bouguer con la diferente densidad de las unidades presentes en la zona de estudio. Posibles variaciones debidas a este efecto en la anomalía Bouguer, estarían enmascaradas por las dos tendencias principales, comentadas previamente, que aparecen en los resultados.



**Figura 5.** Mapa de anomalías Bouguer del sureste peninsular. Tomado del Atlas Nacional de España, Sección II, Grupo 8, Geofísica (Ed. IGN).



**Figura 6.** Anomalía de la gravedad obtenida superpuesta al mapa geológico de la zona (Instituto Geológico y Minero de España, Hoja 947, Serie MAGNA 50). Los tonos del mapa original han sido ligeramente modificados para poder distinguir los principales conjuntos de materiales descritos en el texto. Tonalidades verdosas: calizas y margas de las unidades Prebéticas. Tonalidades amarillas: margas y conglomerados del Mioceno Superior - Plioceno. Tonos ocre - anaranjados: unidades del Guadalquivir.

En cualquier caso, se observa cómo el mínimo de anomalía Bouguer se encuentra al norte de las mayores alturas del frente montañoso de las Béticas sobre el Guadalquivir. Esta distribución de valores podría ser debida a irregularidades en el basamento Hercínico (como se ilustran hipotéticamente en el corte geológico de la figura 2), o bien a heterogeneidades en la unidad del Guadalquivir, posiblemente condicionadas por el propio desarrollo del frente

montañoso. Más difícil de explicar es el aumento observado en los valores de anomalía hacia el SW, justamente hacia donde se encuentra la máxima altura local, el pico Jabalcuz.

Sería necesario densificar las medidas, a la hora de aumentar la definición del resultado y poder encontrar la correlación buscada, así como ampliar la zona de estudio, pudiendo establecer mejor, y quizás explicar, las tendencias observadas.