

DIAPIRO DE SALINAS DE AÑANA: ¿UN DIAPIRO CON UN OVERHANG? MODELO 3D GRAVIMETRICO

V. Pinto *, A. Casas * y X. Font *

RESUMEN

Se presenta el mapa gravimétrico de la Cubeta Alavesa, donde se pueden localizar de forma clara los diapiros salinos aflorantes en la misma, y también otras estructuras también diapíricas situadas a mayor profundidad. Se ha modelizado en 3D, mediante dos técnicas gravimétricas diferentes, el diapiro de Salinas de Añana. El cual presenta una gran extensión en superficie pero que en cambio no se proyecta de la misma manera en profundidad, habiéndose detectado la presencia de una extensión lateral u overhang hacia el SW.

Palabras clave: *Diapiro, modelo 3D, gravimetría.*

ABSTRACT

A new gravity map of the Cubeta Alavesa has been compiled and interpreted. In this map the gravity lows produced by the outcropping evaporitic diapirs and other deeper structures are very well depicted. The gravity low of the Salinas de Añana diapir has been modelled using two different 3D methods. The density model obtained has a great extension at surface but not in depth, given a lateral extension or overhang dipping to the SW.

Key words: *Diapir, 3D model, gravimetry.*

Introducción

La aplicación de la gravimetría para la localización y cuantificación de estructuras diapíricas de materiales salinos, se remonta a mediados de los años cuarenta y ha ido evolucionando con el tiempo. Peters *et al.* (1945), Allen *et al.* (1995), Nettleton (1968) y Spector *et al.* (1970), Pinto (1992), entre otros utilizan la gravimetría, en mayor o menor medida, para la localización, evaluación y modelización cualitativa y cuantitativa de diapiros salinos. El buen contraste de densidad entre los materiales del diapiro y los materiales que lo encajan, permite una buena relación señal-ruido, pudiendo obtener cartografías de anomalías gravimétricas muy claras, que permiten en muchas ocasiones plantearse una modelización cuantitativa. El carácter puntual de estas anomalías no sólo permite, sino también recomienda, una modelización gravimétrica en tres dimensiones. En este trabajo se presenta el modelo geométri-

co 3D, obtenido a partir de la gravimetría, de unos de los diapiros más característicos de la Cubeta Alavesa, el diapiro de Salinas de Añana.

Situación geográfica y contexto geológico

El diapiro de Salinas de Añana se encuentra situado en la zona central de la Cubeta Alavesa. Esta cubeta se encuentra al Este de la cornisa cantábrica, cerca de las poblaciones de Bilbao, Burgos y Pamplona. Geológicamente la zona se encuentra en la zona sur de la Cuenca Cantábrica en el Dominio Cántabro-Navarro. En este dominio se distinguen dos unidades: la Plataforma Burgalesa, situada al sur y la Cubeta Alavesa más al norte. Es en esta última donde se concentran la mayoría de diapiros Triásicos de origen halocinético y en donde se ha realizado este estudio. Ambas unidades son frontalmente cabalgantes entre sí (Montes de Tesla y Obarenes). El límite sur

* Departamento Geoquímicas, Petrología y Prospección Geológica. Facultad de Geología. Universidad de Barcelona. Martí Franques, s/n. 08071 Barcelona.

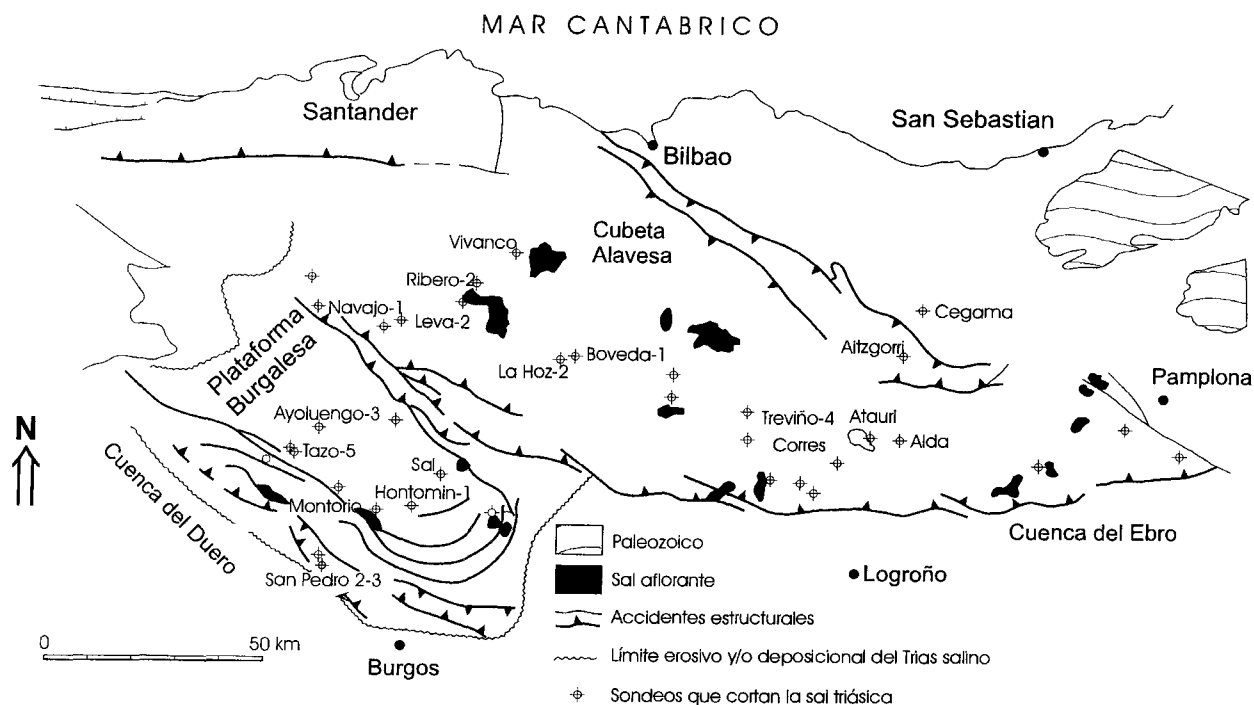


Fig. 1.—Mapa de situación.

oriental de la Cubeta lo constituye otro frente cabalgante, pero esta vez, sobre la Cuenca del Ebro (Montes Cantabria). Al norte de la cubeta, limitado por otro frente cabalgante (Anticlinorio de Bilbao) está situado el llamado Arco Vasco (fig. 1).

Siguiendo los estudios realizados por Serrano *et al.* (1990), la tectónica en el dominio Cántabro corresponde a un régimen extensivo que se extiende desde el Triásico hasta el Cretácico Superior. En esta etapa se produce una intensa diferenciación halocinética relacionada con accidentes de sustrato. El movimiento halocinético provoca la aparición de pequeñas cubetas que condicionarán la sedimentación mesozoica en el área. Después de esta fase extensiva se producen las deformaciones alpinas.

En conjunto, la profundidad del techo del Triás salino aumenta hacia el noreste, en relación con la progresiva profundización de la cuenca. No obstante, en esta zona se puede encontrar la sal aflorante o la poca profundidad. Esto es debido a que la sal, inicialmente muy profunda, ha sido afectada por halocinesis llegando a extruir en forma de altos salinos o diapiros.

El Triásico salino en la cubeta alavesa está formado por el Muschelkalk y el Keuper. El Muschelkalk está constituido por tres miembros; una unidad basal formada por dolomías y calizas, una unidad media constituida por calizas laminadas y por último una

superior compuesta de calizas y margas dolomíticas. El Keuper está constituido por una serie salina con intercalaciones arcillosas, anhidritas, dolomíticas y ofíticas. El techo del Triás lo constituye una alternancia de anhidrita y dolomías del Lias Inferior (carniolas). La deposición de estos materiales está fuertemente condicionada por la halocinesis, llegando muchas veces a estar erosionados y/o no depositados en los altos de las estructuras salinas.

El movimiento de la sal está relacionado con fallas del sustrato que pueden afectar, también al Triásico y Jurásico. La reactivación de estas fallas durante la deposición de estos materiales favorece la diferenciación halocinética, generándose fallas de colapso que permiten el desarrollo de altos salinos, de estructura muy compleja, que pueden llegar a la extrusión. La evolución de los altos salinos condiciona zonas de gran sedimentación (Cretácico Inferior), creando alrededor potentes cubetas de sedimentos (Villarcayo, Treviño, etc.).

Mapa de anomalías de Bouguer y modelización gravimétrica

Lozano (1963) realiza un primer levantamiento gravimétrico de Navarra. Posteriormente, Nettleton (1968) realiza una exploración geofísica de cierta

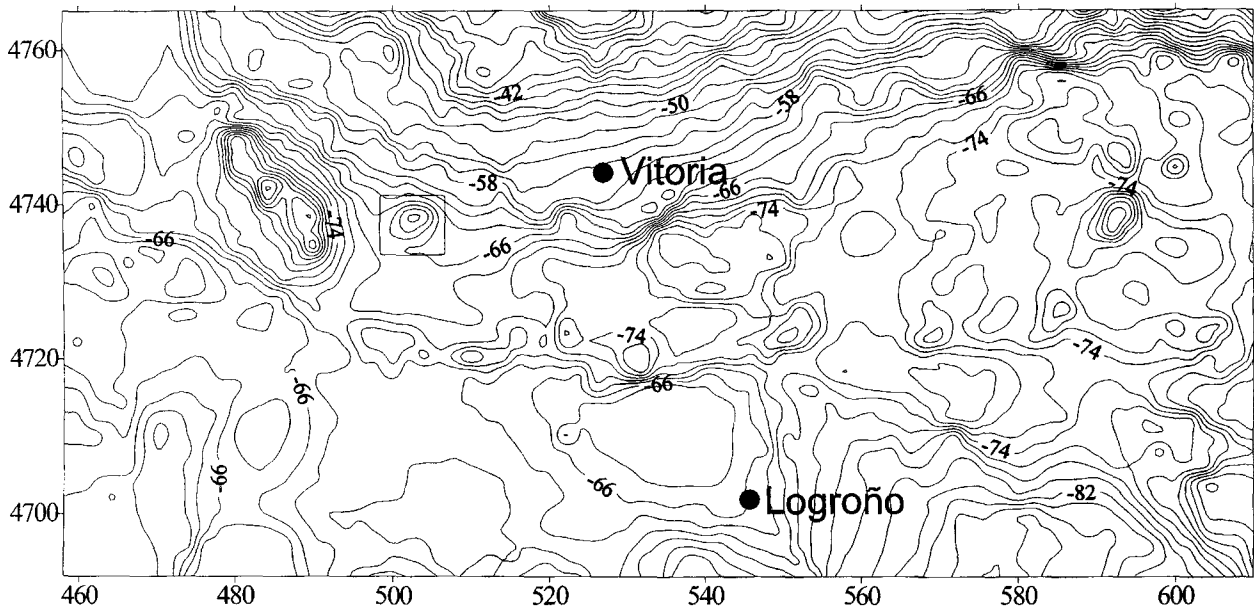


Fig. 2.—Mapa de anomalía de bouguer de la Cubeta Alavesa y situación del diapiro de Salinas de Añana.

envergadura en la zona, basada fundamentalmente en una campaña de prospección gravimétrica. Este autor realiza la modelización de los diapiros mediante perfiles 2D, en base a asumir las masas anómalas a volúmenes esféricos de sal con enclaves prismáticos más densos (ofitas).

Para el estudio que aquí se presenta se han utilizado más de 10.000 datos gravimétricos, distribuidos por toda la cubeta. Los datos están referidos al IGSN'71, con corrección topográfica hasta 22 km y densidad de reducción de 2,67 g/cm³ (fig. 2).

La anomalía regional presenta un gradiente positivo hacia el norte producido por el hundimiento de

más de 10 km de la corteza oceánica en el NW de la Península Ibérica (Sibuet *et al.*, 1970).

El diapiro modelizado presenta en planta una forma oval con los flancos muy verticalizados, y con algunas inclusiones de materiales ofíticos. La morfología de los flancos obtenida en una sección sísmica (Serrano *et al.*, 1990) a lo largo de un perfil que corta al diapiro según una de dirección SW-NE, presenta una morfología más estrecha en su parte superior e inferior y más ancha a una profundidad intermedia.

El mapa de anomalías de Bouguer (fig. 3) señala de forma clara la presencia de una estructura de

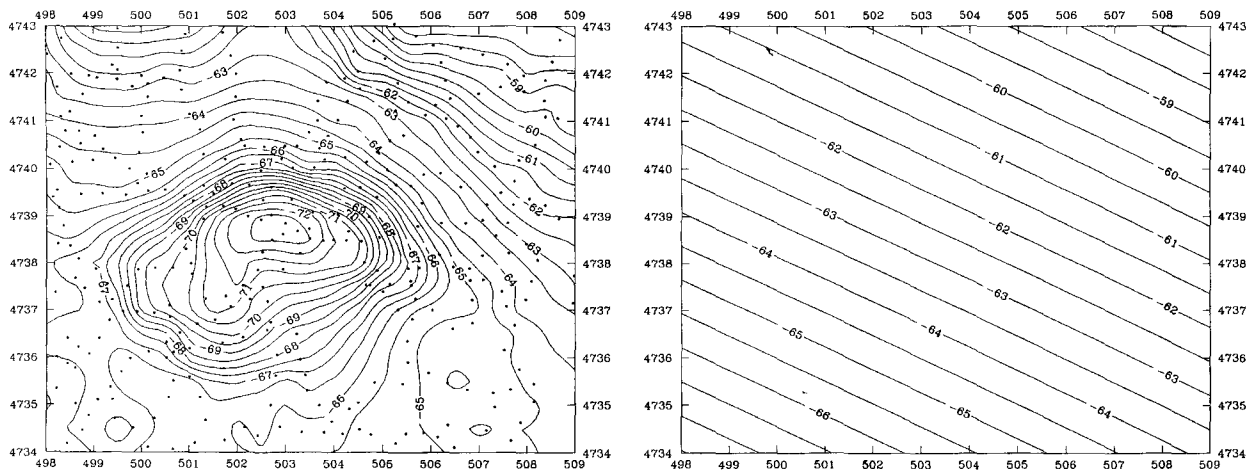


Fig. 3.—Mapa de anomalía de bouguer y regional.

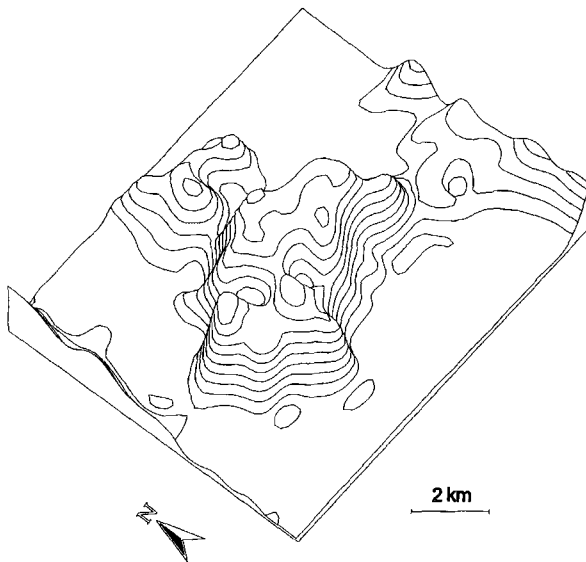


Fig. 4.—Modelo sintético del diapiro de Salinas de Añana.

densidad menor que el encajante y con una morfología más o menos oval en planta. Se diferencian claramente dos mínimos relativos, uno que se extiende hacia el SW y otro hacia el WSW. También se observa una cierta tendencia de las anomalías hacia el Norte. El mapa de anomalías residuales se ha obtenido mediante un ajuste polinómico iterativo de grado 2 que permite la eliminación automática de las pseudoanomalías que suelen aparecer en estas zonas, debido a la presencia simultánea de cuerpos de contrastes de densidad de signo opuesto (Pinto, 1992).

Para la cuantificación espacial del diapiro de Salinas de Añana se han utilizado dos sistemas software (Pinto & Casas, 1996), que permiten realizar la modelización gravimétrica interactiva 3D de estructuras geológicas. Existen fundamentalmente dos formas de construir los modelos 3D, definiendo de esta manera dos métodos diferentes de modelización; métodos analíticos y métodos sintéticos.

Métodos analíticos

El algoritmo calcula la anomalía teórica de un poliedro definido por una serie de caras triangulares, en puntos de observación externos o internos al cuerpo.

El método utilizado (Pinto, 1992, Pinto & Casas, 1996), se basa en primer lugar en definir las coordenadas de las caras triangulares que delimitan el modelo, a continuación se realiza un proceso de test que define el tipo de contribución de cada una de

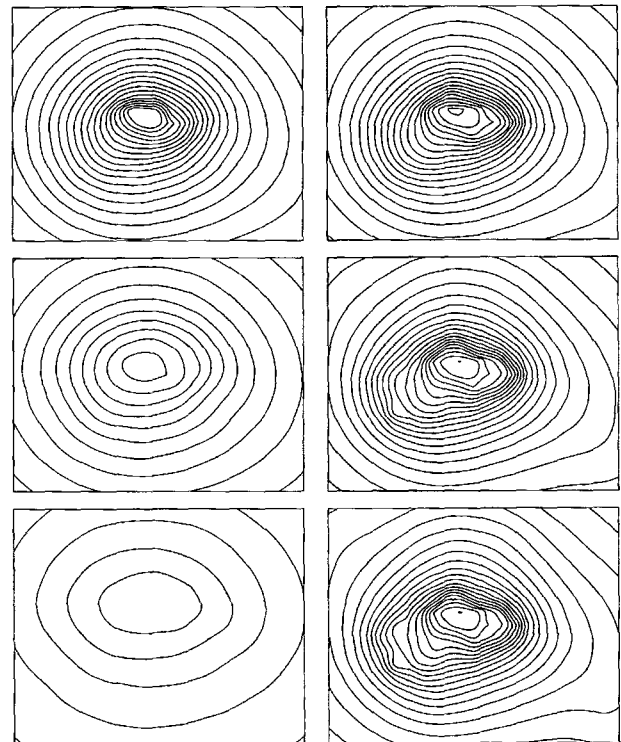


Fig. 5.—Evolución de las anomalías teóricas, empezando en el extremo inferior izquierdo y en el sentido de las agujas del reloj (iteraciones 1, 3, 7, 12, 20, 30).

las caras (caras convexas, caras cóncavas). El método está basado en la teoría de los volúmenes no convexos que se utilizan comúnmente en gráficos 3D de ordenador. Un volumen no convexo es aquel en el cual pueden existir puntos intermedios situados fuera del volumen entre la línea que une dos puntos interiores. El volumen de un cuerpo de este tipo se puede calcular por la suma de los volúmenes de prismas triangulares, definidos por cada cara, considerados de extensión infinita en el eje negativo Z. Las caras convexas tendrán una contribución positiva y las cóncavas negativa.

Métodos sintéticos

La modelización gravimétrica mediante métodos sintéticos se basa en procedimientos que asumen la geometría del cuerpo geológico, a un conjunto de cuerpos geométricos sencillos. Generalmente se trata de métodos automáticos de inversión. Estos métodos, ampliamente utilizados desde hace años Bott (1960) y Cordell & Henderson (1968), consisten en aproximar la geometría del cuerpo geológico a una serie de prismas verticales, mediante un procedimiento iterativo de análisis de error, y a partir

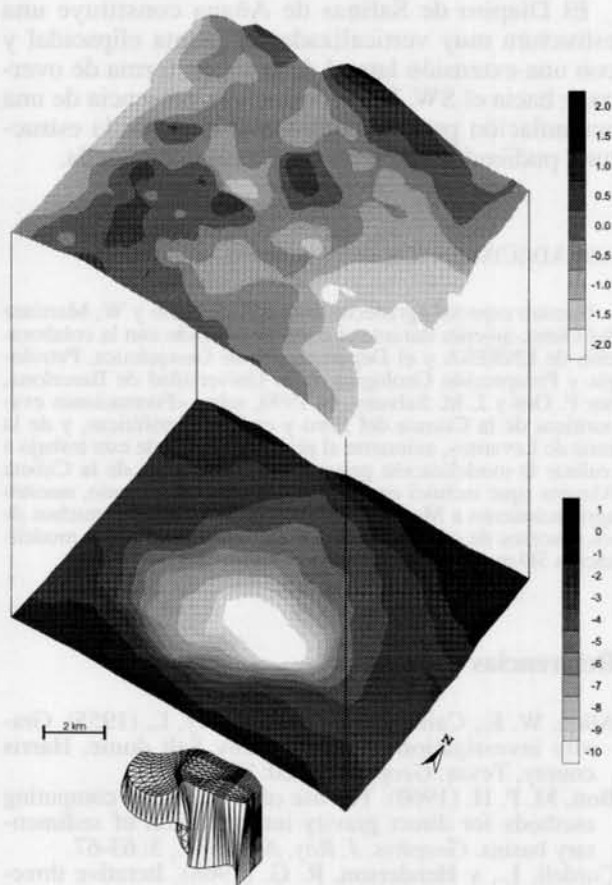


Fig. 6.—Modelo analítico del diapiro de Salinas de Añana.

de un modelo inicial, se obtiene un modelo geométrico teórico, cuya anomalía difiere poco con la anomalía experimental. En cada iteración la altura o grosor de los prismas varía, según determinado criterio, ajustándose las anomalías teóricas a las experimentales.

Modelo tridimensional sintético

Debido al elevado número de estaciones de lectura así como a su buena distribución espacial, se ha utilizado un intervalo de malla (lado del prisma) de 500 metros, lo que ha permitido obtener una buena resolución del modelo. A partir de datos de sondeo y de sísmica, la profundidad de la capa de sal se ha situado a -3,5 km. Después de varios ensayos, y teniendo en cuenta que el diapiro es aflorante en una considerable extensión, el contraste de densidad más adecuado ha sido de -2 g/cm^3 , lo que equivale a asignar al encajante una densidad de $2,5 \text{ g/cm}^3$ y al modelo una densidad de $2,3 \text{ g/cm}^3$.

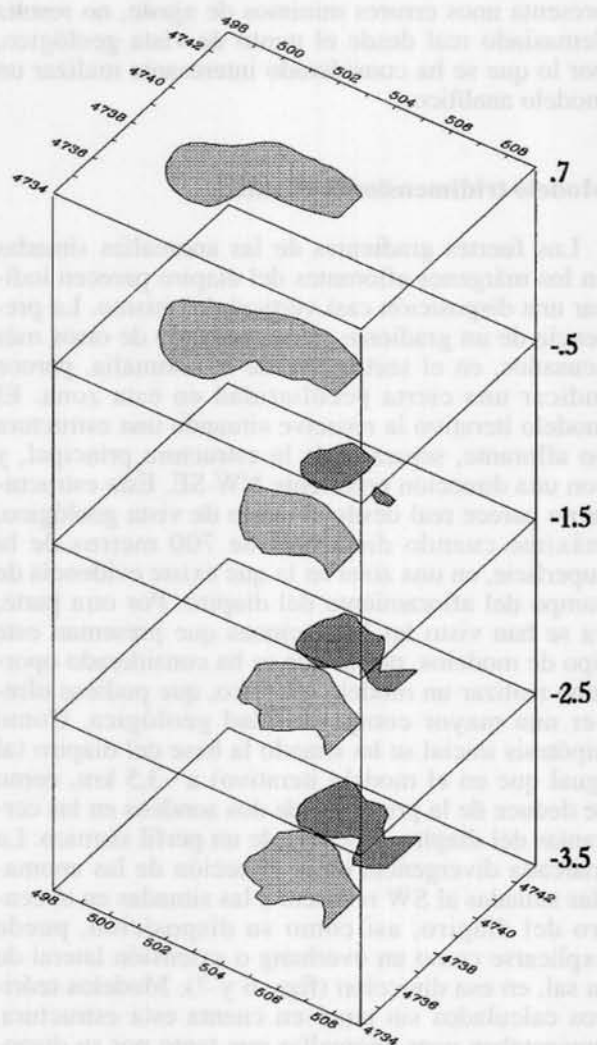


Fig. 7.—Sección 3D analítico del diapiro de Salinas de Añana.

El modelo se ajusta con bastante rapidez y aceptable convergencia (figs. 4 y 5), destacándose la extensión, en profundidad, de la sal en dirección SE. La presencia de efectos de borde empieza a hacerse patente en la iteración 7, tanto en el oeste de la zona como en el SE. Estos efectos habría que explicarlos como una extensión lateral de la sal, no contemplada en la zona abarcada. Las anomalías teóricas evolucionan a la par, destacándose el cambio de sentido de la dirección preferente de las anomalías a partir de la iteración 12, pasando de ser prácticamente EW a tener una disposición más compleja. Esta se manifiesta por la presencia, en el modelo de dos zonas, diferenciadas y separadas entre sí, y que responden a las dos direcciones preferentes de las anomalías. La morfología resultante, si bien como ya se verá en las próximas páginas,

presenta unos errores mínimos de ajuste, no resulta demasiado real desde el punto de vista geológico, por lo que se ha considerado interesante realizar un modelo analítico.

Modelo tridimensional analítico

Los fuertes gradientes de las anomalías situadas en los márgenes aflorantes del diapiro parecen indicar una disposición casi vertical del mismo. La presencia de un gradiente suave, rodeado de otros más acusados, en el sector SW de la anomalía, parece indicar una cierta peculiaridad en esta zona. El modelo iterativo la resuelve situando una estructura no aflorante, separada de la estructura principal, y con una dirección preferente NW-SE. Esta estructura no parece real desde el punto de vista geológico, máxime cuando dista más de 700 metros de la superficie, en una zona en la que existe evidencia de campo del afloramiento del diapiro. Por otra parte, ya se han visto las limitaciones que presentan este tipo de modelos, por lo que se ha considerado oportuno realizar un modelo analítico, que pudiese ofrecer una mayor compatibilidad geológica. Como hipótesis inicial se ha situado la base del diapiro (al igual que en el modelo iterativo) a $-3,5$ km, como se deduce de la presencia de dos sondeos en las cercanías del diapiro así como de un perfil sísmico. La marcada divergencia en la dirección de las anomalías situadas al SW respecto a las situadas en el centro del diapiro, así como su disposición, puede explicarse como un overhang o extensión lateral de la sal, en esa dirección (figs. 6 y 7). Modelos teóricos calculados sin tener en cuenta esta estructura, presentaban unas anomalías que tanto por su disposición como por su valor, difieren en gran medida de las anomalías experimentales. Es en base a esta hipótesis teórica sobre la que se ha planteado la construcción del modelo inicial, que se ha modificado sucesivamente hasta obtener un ajuste aceptable entre la anomalía experimental y la teórica.

Conclusiones

La modelización gravimétrica 3D aplicada al diapiro de Salinas de Añana ha permitido obtener una buena representación espacial de esta estructura tanto en superficie como en profundidad, la aplicación simultánea de modelos analíticos y sintéticos, ha permitido aprovechar al máximo las posibilidades de la prospección gravimétrica de estructuras verticalizadas, demostrando claramente las amplias posibilidades de este método como herramienta prospectiva 3D de estructuras diapíricas.

El Diapiro de Salinas de Añana constituye una estructura muy verticalizada, de planta elipsoidal y con una extensión lateral de la sal en forma de overhang hacia el SW. Es de destacar la presencia de una acumulación profunda situada al norte de la estructura, pudiendo estar o no conectada con aquella.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro especial agradecimiento a A. Serrano y W. Martínez del Olmo, quienes durante el curso organizado con la colaboración de ENRESA y el Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica de la Universidad de Barcelona, por F. Ortí y J. M. Salvany, en 1990, sobre «Formaciones evaporíticas de la Cuenca del Ebro y cadenas periféricas, y de la zona de Levante», animaron al primer firmante de este trabajo a realizar la modelización gravimétrica de la zona de la Cubeta Alavesa (que incluyó en su tesis doctoral). Asimismo, nuestro agradecimiento a María Gil López que colaboró en muchos de los procesos de cálculo numérico en la metodología de modelización 3D mediante modelos analíticos.

Referencias

- Allen, W. E., Caillouet, H. J., y Stanley, L. (1955). Gravity investigations in the Hockey Salt dome, Harris county, Texas. *Geophysics*, 20: 829-840.
- Bott, M. P. H. (1960). The use of rapid digital computing methods for direct gravity interpretation of sedimentary basins. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 3: 63-67.
- Cordell, L., y Henderson, R. G. (1968). Iterative three-dimensional solution of gravity data using a digital computer. *Geophysics*, 33: 596-601.
- Nettleton, I. I. (1968). Gravity anomalies over salt diapirs. Northern Spain. *Sp. Paper Geol. Soc. America*, 88: 75-82.
- Peters, J. W., y Dugan, A. F. (1945). Gravity and magnetic investigations at the Grand Saline salt dome, Van Zandt CO., TEXAS. *Geophysics*, 10: 376-393.
- Pinto, V. (1992). *Modelización gravimétrica interactiva 2D y 3D de estructuras geológicas. Su aplicación a los diapiros salinos*, Universidad de Barcelona, 506 págs.
- Pinto, V., y Casas, A. (1996). An interactive 2D and 3D gravity modeling program for IBM-compatible personal computers. *Computers & Geosciences*, 22: 535-546.
- Serrano, A., y Martínez del Olmo, W. (1990). Tectónica salina en el Dominio Cantábrico-Navarro: evolución, edad y origen de las estructuras salinas. *Formaciones evaporíticas de la Cuenca del Ebro y cadenas periféricas, y de la zona de Levante* (F. Ortí y J. M. Salvany, eds.), ENRESA-GPPG, 39-53.
- Sibuet, J. C., y Le Pichon, X. (1970). Structure gravimétrique du Golfe de Gascogne et le Fosse Marginal Nord-Espagnol. *Simposium sur l'histoire structural du Golfe de Gascogne*, Ed. Thecnip, VI 9-1, VI 9-17.
- Spector, A., y Hornal, R. W. (1970). Gravity studies over three evaporite piercement domes in the Canadian Arctic. *Geophysics*, 35: 57-65.

Recibido el 12 de junio de 1998.
Aceptado el 27 de julio de 1998.