

Análisis estructural mediante utilización conjunta de imágenes TM y gravimétricas.

Ll. Solé Sugrañes, E. Hernández Chiva y S. Martínez Alonso

Instituto "Jaime Almera", C.S.I.C. Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona

INTRODUCCION

Desde el inicio del estudio de las imágenes obtenidas mediante satélites de observación, el análisis de lineaciones, que de algún modo se atribuyen a sistemas de fracturas o a indicadores de las estructuras geológicas, ha constituido una importante aportación a los estudios tectónicos regionales. Sin embargo, en la mayoría de los trabajos anteriores la identificación y extracción de las lineaciones se ha realizado de forma manual sobre productos en soporte de papel o interactivamente sobre combinaciones espectrales adecuadas para realzar los contornos y contrastes en las imágenes (Yan et al. 1982; Cirilio y Poscoreli, 1984; Green et al. 1985; Pearson y Yearley, 1986). Estos métodos plantean problemas importantes de subjetividad respecto a la interpretación de la significación de las lineaciones (Babcock, 1974, Moore y Waltz, 1983). Algunos trabajos previos muestran que únicamente el tratamiento estadístico de las mismas tiene significado estructural (Solé Sugrañes, 1978 a), por lo que es necesario identificar de forma objetiva un gran número de lineaciones para obtener resultados estadísticamente significativos. Para intentar

conseguir una relativa mayor objetividad y rapidez de análisis se han utilizado algunos algoritmos de reforzamiento y discriminación automática de cambios bruscos de tonalidad mediante ordenadores de propósito general (Coupland y Vincent, 1981; Yang, 1983), pero resultan muy costosos en cuanto a uso de CPU, por lo que se ha ensayado su implementación en un analizador de imágenes, con posibilidad interactiva de seleccionar las características de las lineaciones (longitud, orientación, grado de linealidad) que se aceptan o rechazan en el estudio.

Recientemente, algunos trabajos de prospección geoquímica y minera (Offield et al. 1977; Green, 1984; Aarnisalo, 1984) han puesto de manifiesto la correlación existente entre este tipo de lineaciones y las anomalías gravimétricas, magnéticas o geoquímicas, pero en la mayoría de ellos las lineaciones siguen detectándose de forma manual, sin evitar los problemas de subjetividad. La importancia cada vez mayor de la Teledetección en las prospecciones mineras hace necesario una mayor profundización en la significación de las lineaciones detectables en las imágenes de satélite, así como la instrumentalización de sistemas de análisis lo más objetivos posible.

En este trabajo se presenta la metodología empleada en la detección automática de lineaciones a partir de imágenes Thematic Mapper y su comparación interactiva con datos gravimétricos. Así mismo se ha realizado un estudio de la bondad y significación de las lineaciones obtenidas utilizando como área test un sector del Prepirineo Oriental y Depresión Central Catalana. Para la confección del mapa gravimétrico con el que se compararon las lineaciones se utilizaron datos de 100 estaciones de la misma zona, obtenidos por el Departamento de Prospección Geológica y Geofísica de la Universidad de Barcelona.

El trabajo ha sido íntegramente desarrollado en el Instituto Jaime Almera del C.S.I.C. (Barcelona), utilizando un analizador de imágenes IPS 2000 de KONTRON BILDANALYSE Gmb, conectado a un miniordenador VAX 11/730. Aparte del software IBAS del analizador de imágenes, se ha utilizado el conjunto de programas JARS, especiales para Teledetección, desarrollados en el propio Instituto.

ENCUADRE GEOLOGICO DEL AREA TEST

Para el desarrollo del estudio se han seleccionado dos áreas test (Fig. 1): una primera área de 943 km² en el alto valle del Segre y una segunda área de 3775 km², que comprende parte del Prepirineo entre los ríos Segre y Llobregat y de la Depresión Central Catalana. Ambas áreas están comprendidas en la imagen 198-31-2 de 28/7/84 del sensor Thematic Mapper del satélite LANDSAT 5. En ambos casos se han utilizado subimágenes de 512 x 512 pixels, con un nivel de compactación 2 (resolución de 60 m) en el primer caso y un nivel 4 en el segundo (resolución espacial 120 m). La primera área test es una subescena de la segunda.

El área estudiada comprende una estrecha franja septentrional en la que aflora el basamento herciniano de la Zona Axial Pirenaica, una franja central formada por los materiales alpinos de las unidades alóctonas pirenaicas (Unidad Montsec y manto del Pedraforca, Solé-Sugrañes, 1978 b) y una tercera franja meridional, de contacto entre el Prepirineo y la Depresión del Ebro, formada por molasas pirenaicas, sólo afectadas por pliegues laxos y algunas fracturas tardipirenaicas o postpirenaicas.

Esta zona muestra un especial interés para el estudio de la significación de las lineaciones, ya que en ella coexisten las direcciones estructurales E-W, típicamente pirenaicas, con direcciones NE-SW, paralelas a grandes accidentes transversales tales como la falla del Segre (Solé-Sugrañes y Souquet, 1980; Pous et al. 1986), que afectan tanto los materiales alpinos como el basamento herciniano.

OBTENCION Y ANALISIS DE LAS LINEACIONES

En el presente trabajo se ha pretendido utilizar el potencial de los coprocesadores paralelos para la detección automática de lineaciones, obviando de esta forma los problemas de subjetividad (Moore y Waltz, 1983) puestos de manifiesto en los procesos de selección manual. Desde el punto de vista del proceso se consideran lineaciones aquellos cambios bruscos de intensidad o contactos entre masas de intensidad relativamente homogéneas, que cumplan los requisitos morfológicos (longitud, linearidad, intensidad) predefinidos. Para que este tipo de lineaciones tengan significación estructural deberán corresponderse con las lineaciones ya definidas por Hobbs en 1904 "líneas de drenaje, divisorias de agua, contactos litológicos y límites de afloramiento" o con la extensión que de las mismas hacen O'Leary et al. en 1976 "estructuras lineales simples o compuestas, cartografiables en superficie, rectas o ligeramente curvas, que se diferencian por su aspecto de las estructuras adyacentes y probablemente reflejan un fenómeno subyacente". La significación estructural de las lineaciones detectadas en las imágenes de satélite también podría definirse por su correspondencia con fenómenos gravimétricos profundos, de sutil apariencia en superficie. Sin embargo,

dada la naturaleza de las imágenes de satélite utilizadas, es más razonable suponer que la mayoría de los cambios bruscos de intensidad registrados deben tener una representación superficial. La mayor o menor adecuación de las lineaciones detectadas automáticamente a los conceptos de lineación definidos por los autores anteriores dependerá de la adecuada selección de las imágenes, así como de las restricciones geométricas que se impongan al detector.

El sistema diseñado consta de un proceso de realce del contraste de la imagen por expansión de la distribución de frecuencia de intensidades (normalización del histograma de grises), de forma que se utilicen totalmente los 256 niveles de intensidad que permite el analizador utilizado. Para la individualización de las lineaciones se han usado tanto filtros direccionales como filtros de tipo laplaciano. Las estructuras resultantes se binarizan y adelgazan por erosión progresiva hasta que su anchura es de un solo pixel. Para cada una de estas estructuras, debidamente indexadas, se mide la posición de su centro de gravedad, el número total de pixels, la distancia entre los extremos y el ángulo que forma con la dirección meridiana la línea que une los dos extremos de la misma. La relación entre el número de pixels de la estructura y la distancia entre los extremos es un buen indicador del grado de linearidad de la misma, y puede servir como criterio de selectividad.

En el caso de intentar poner de manifiesto únicamente lineaciones con una orientación preferente, se han mostrado muy eficaces los filtros estructurales formados por matrices de convolución de 3x3 del tipo

$$\begin{array}{ccc} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{array}$$

Sin embargo, en el caso más frecuente de querer identificar todas las lineaciones existentes, este sistema es

relativamente poco eficaz, ya que se necesitan 8 convoluciones para cubrir con el mismo grado de eficacia todas las direcciones del espacio. Por ello se han utilizado filtros laplacianos, simulados con una matriz de convolución de 5x5 del tipo

$$\begin{array}{c} . \\ . \\ . \end{array} \begin{array}{c} 20 \\ 6 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \begin{array}{c} -4 \\ -3 \\ -1 \\ . \\ . \end{array}$$

Tanto los filtros direccionales como los de tipo laplaciano se han probado sobre las bandas de longitud de onda visible, sobre la banda infrarroja TM7 y sobre la banda térmica TM6. En todas ellas el detector de lineaciones trabaja por un igual, pero tanto en las bandas visibles como en la banda TM7, muy afectadas por la respuesta radiométrica de la vegetación y de la humedad, se detectan un número excesivo de contrastes, relativamente rectilíneos, que corresponden a límites de campos de cultivo y otras estructuras introducidas por el hombre, perdiéndose en gran parte su significación estructural. Sin embargo, la banda TM6, con una menor resolución espacial, y mucho menos sensible a las variaciones de la humedad y de la vegetación, se ha mostrado mucho más útil, ya que los cambios de tonalidad (cambios en la inercia o capacidad térmicas) parecen más relacionados con la naturaleza litológica, y en muchos casos revelan más la inercia térmica del subsuelo, que la reflectancia o capacidad de calentamiento de la cubierta vegetal o edáfica más superficial. A pesar de ello, aun un cierto número de las lineaciones detectadas y no rechazadas por tamaño o falta de linearidad, corresponden a fenómenos de origen antrópico, independientes de la estructura geológica.

Las significación de las lineaciones identificadas y no rechazadas se han analizado tanto comparandolas indivi-

dualmente con las imágenes TM y con mapas geológicos a escala 1:200.000, como analizando estadísticamente su orientación y distribución para poder ser utilizadas como indicadores de la presencia de estructuras profundas. Las lineaciones se han superpuesto directamente en el monitor sobre las imágenes TM, para el análisis de su significación individual, y con el mismo propósito se han superpuesto mediante un trazador automático y previa corrección geométrica sobre mapas geológicos digitalizados.

En el área test, situada en el alto valle del Segre se ha comprobado la significación individual de 898 lineaciones detectadas, comparandolas por superposición con las imágenes TM (lam. I a) y con el mapa geológico a escala 1:200.000.

El examen de las lineaciones ha revelado que:

- el 16% de las mismas se corresponden con estructuras geológicas cartografiadas en el mapa de síntesis a 1:200.000, aunque en la zona mesozoica, cartografiada con mayor detalle, este porcentaje se eleva al 30%.

- un 12% corresponde a contactos litológicos cartografiados en dicho mapa, por lo que son un buen indicativo de la tendencia geológica regional.

- el 50% de las lineaciones reflejan elementos morfológicos del tipo valles o crestas. En las áreas donde el control litológico es importante sobre estas formas, la orientación de las lineaciones sigue teniendo una significación estructural no despreciable.

- un 11% corresponde a límites con estructuras de origen antrópico (carreteras, tipos de vegetación, minas) prácticamente sin significación geológica.

- un 11% no pudo ser identificado sobre el mapa, pudiendo corresponder en su mayoría a cambios de intensidad originados por problemas de iluminación o a accidentes o cambios litológicos no reflejados en superficie, por lo que su significación es de muy difícil atribución.

Este análisis individual revela que si bien la mayoría de los accidentes cartografiados es detectable por este método, sólo cerca de un 30% de las lineaciones tienen una significación estructural en si mismas, mientras que otro 50%, si bien no coinciden directamente con accidentes estructurales, pueden constituir un indicativo de la tendencia regional.

En la segunda área test, con una resolución espacial mitad que en la primera, desaparecen casi por completo las lineaciones debidas a fenómenos de origen antrópico, por lo que aumenta su significación estructural. Sin embargo, también desaparecen las lineaciones inferiores a los 500 m de longitud, que en la imagen menos compactada podían corresponder a accidentes geológicos locales.

Para el análisis de la significación estadística de las orientaciones se ha procedido a construir los histogramas de orientación de las distintas lineaciones, repitiendo el análisis para lineaciones que representen una longitud superior a 1 km, 2 km y 3 km (fig. 2). En dichos histogramas el número de clases se ha seleccionado de acuerdo con la expresión $N_c = 10 \cdot (\log(N))$, siendo N_c el número de clases y N el número total de lineaciones de la muestra considerada.

En todos los histogramas se observa un predominio de las lineaciones correspondientes al intervalo N20 N70, con un máximo secundario correspondiente a la orientación E-W. Estos máximos se diferencian aun más (más de 50% para el máximo principal) cuando sólo se toman en consideración las lineaciones de longitud superior a los 2 km. Una distribución de este tipo es practicamente idéntica a la del análisis de lineaciones de esta área efectuada manualmente sobre imágenes MSS y fotografías aéreas convencionales (Solé Sugrañes, 1978 a).

El máximo principal se corresponde con las direcciones estructurales paralelas a los grandes accidentes transversales, tipo falla del Segre o Catalunya (Solé y Souquet, 1980), que afectan al Pirineo oriental. Las direcciones aproximadamente E-W se corresponden con las directrices generales de las estructuras plegadas pirenaicas.

El análisis de la distribución espacial de la orientación de las lineaciones se ha efectuado reduciendo los datos a una cuadrícula de 3 km de lado. En este análisis se observa que aunque en la mayoría de las cuadrículas predominan las direcciones E-W, las direcciones NE-SW se agrupan en bandas que coinciden con las zonas más afectadas por los grandes accidentes transversales, lo que demuestra la validez de este tipo de análisis para detectar las directrices geológicas generales de una zona y sus variaciones locales.

OBTENCION DE LA IMAGEN GRAVIMETRICA

A partir de las observaciones del campo gravífico terrestre obtenidas durante la campaña, se calculó la anomalía de Bouger asociada a cada estación. Esta anomalía representa el efecto producido por la existencia de heterogeneidades en la densidad de los materiales que forman la corteza terrestre, por lo que se halla directamente relacionada con la distribución de cuerpos geológicos y con su estructura.

La imagen gravimétrica asociada a dicha anomalía (lam I b) se obtuvo por reducción e interpolación de los datos, que habían sido tomados irregularmente en el campo, sobre una malla regular de 512x512 pixels, directamente superponible

a la imagen TM a analizar. La adecuación de la malla gravimétrica a la la imagen TM se consiguió aplicando la corrección geométrica de Helmert (Miszalok, 1985) a partir de puntos de control geográficos, perfectamente característicos y previamente introducidos sobre la imagen gravimétrica.

La interpolación para conseguir la malla regular se realizó por el método de Akima (1978), consistente en hacer pasar por cada uno de los tres puntos, que constituyen cada uno de los vértices de la triangulación óptima (Lawson, 1972), una superficie de quinto grado, distinta para cada triángulo, pero con continuidad en la segunda derivada con cada una de las superficies vecinas. A partir de estas superficies se calcula cada uno de los elementos (i,j) de la malla regular que quedan dentro del triángulo.

Obtenidos los valores de Bouguer sobre una malla regular, se procedió a la obtención de los valores de las anomalías residuales (fig. 3), debidos a variaciones en los materiales más superficiales de la corteza y por ello seguramente más directamente relacionados con las lineaciones cartografiadas en superficie. La obtención de la anomalía regional se obtuvo mediante el uso de filtros de baja frecuencia, de tamaño variables, restando posteriormente dicha anomalía regional a la anomalía de Bouguer. Los mejores resultados para adaptar la anomalía regional obtenida por este procedimiento con la superficie de tendencia normalmente aceptada para esta región se obtuvo con un filtro de 200×200 , de tal forma que a cada punto se le asignaba el valor promedio de los 40.000 puntos vecinos más próximos.

ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

La comparación, por superposición en el monitor del analizador de imágenes, de las anomalías residuales gravimétricas con las imágenes TM permite analizar la significación de las mismas de forma muy cómoda y rápida. Así ha podido observarse, que los mínimos gravimétricos situados en el SE de la imagen, se corresponden con afloramientos diapíricos de evaporitas terciarias en los núcleos anticlinales de Suria y Cardona, mientras que los mínimos gravimétricos que se encuentran dentro del área de materiales alpinos alóctonos, coinciden con acumulaciones de materiales evaporíticos triásicos en las zonas frontales de los mantos de cabalgamiento. En alguno de estos mínimos la acumulación salina no es evidente, como ocurre en la Serra del Verd y en la terminación occidental del Cadí, pero puede suponerse que debe existir por coincidir con una situación estructural parecida a la del valle del Llobregat, donde tales acumulaciones son bien conocidas.

Sin embargo, no es tan evidente la explicación de algunos máximos gravimétricos, tales como el que aparece al norte del Cadí, o como el aún más pronunciado, que aparece en el SE de la zona analizada, entre las estructuras de Suria y Cardona, y que aproximadamente se centra sobre la terminación oriental del diapiro de Cardona.

La comparación entre la distribución de las lineaciones obtenidas y el mapa de anomalías de Bouger, permite observar que existe una fuerte concentración de líneas de orientación aproximada NE-SW, que se superpone con una zona de máximo gradiente gravimétrico, que presenta la misma orientación. En líneas generales esta zona se corresponde con la definición en superficie de la denominada zona de trituración de la falla del Segre (Caus et al. 1987). Así puede comprobarse como la concentración espacial de las líneas detectadas de forma automática es capaz de localizar la presencia de

accidentes importantes, que tienen una fuerte manifestación en la estructura profunda y que frecuentemente son de difícil localización con los métodos de cartografía geológica convencionales.

Sin embargo, el mapa de anomalía de Bouger pone de manifiesto la existencia de otra zona de fuerte gradiente, que cruza toda la zona estudiada en dirección NW-SE, y que no se traduce en una anómala concentración de lineaciones en esta dirección ni en esta zona. En la parte central del área estudiada, esta franja de alto gradiente se corresponde con la falla del Cardener (Solé Sugrañes, 1973; Solé Sugrañes 1978 b) cuya edad e importancia son de difícil atribución. El hecho de que no se traduzca en una fuerte concentración de lineaciones superficiales puede deberse a problemas intrínsecos al sistema utilizado en su detección o bien a que se trate de una estructura más antigua que la falla del Segre y que gran parte de las estructuras superficiales hayan sido enmascaradas por la sedimentación y movimientos más tardíos. De hecho, los mapas geológicos existentes sólo detectan esta estructura en un pequeño tramo en el alto valle del Cardener al pie de Port de Compte.

El conjunto del análisis muestra, que tanto la distribución espacial, como el análisis estadístico de las direcciones detectadas de forma automática sobre las imágenes Thematic Mapper, pueden ser utilizados para la localización de los principales accidentes y para el análisis de las direcciones estructurales, aunque no pueda atribuirse a priori una significación estructural individualizada a cada lineación particular. Así mismo, es de destacar la facilidad que representa para los estudios tectónicos regionales la utilización conjunta de imágenes TM y datos gravimétricos en un procesador de imágenes del tipo utilizado en el presente estudio.

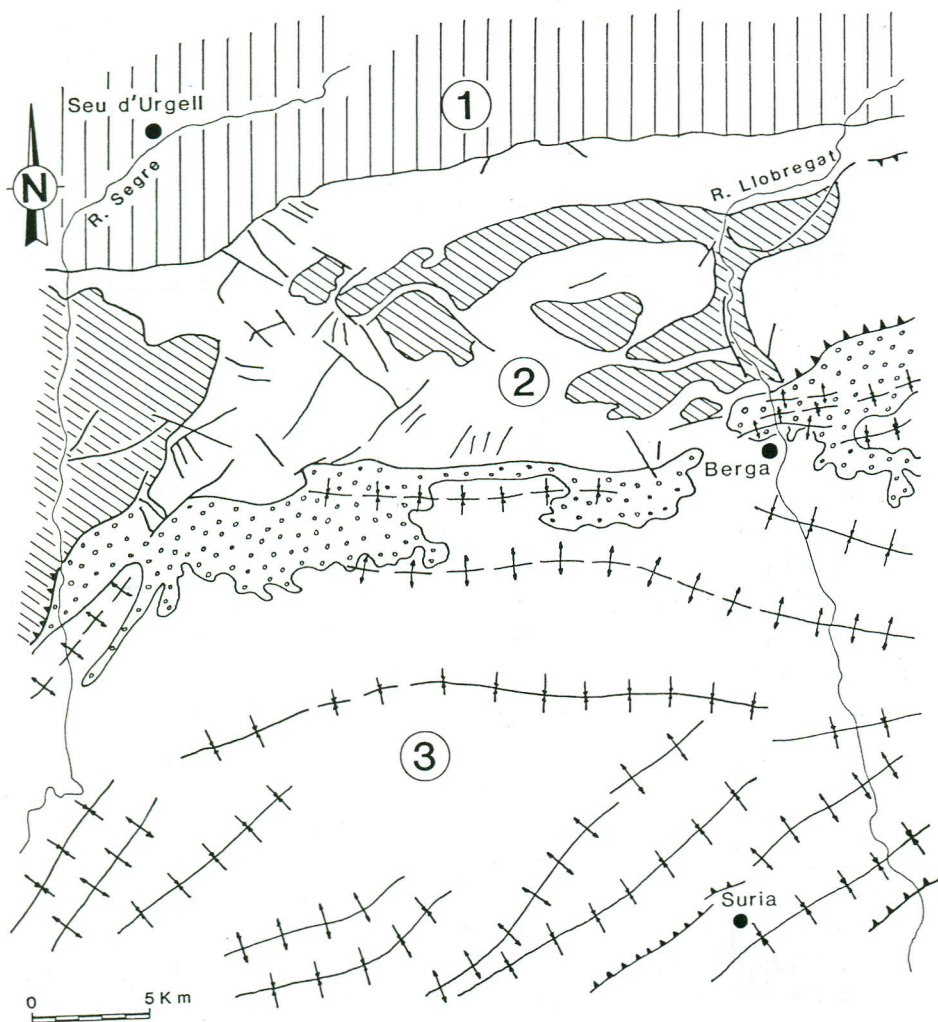


FIG.1- Esquema estructural del área test en la que se realizó el análisis de las lineaciones. Unidad 1, basamento herciniano de la Zona Axial Pirenaica. Unidad 2, unidades alóctonas del Prepirineo (Manto del Pedraforca y Unidad Montsec). Unidad 3, materiales terciarios postpirenaicos de la Depresión del Ebro.

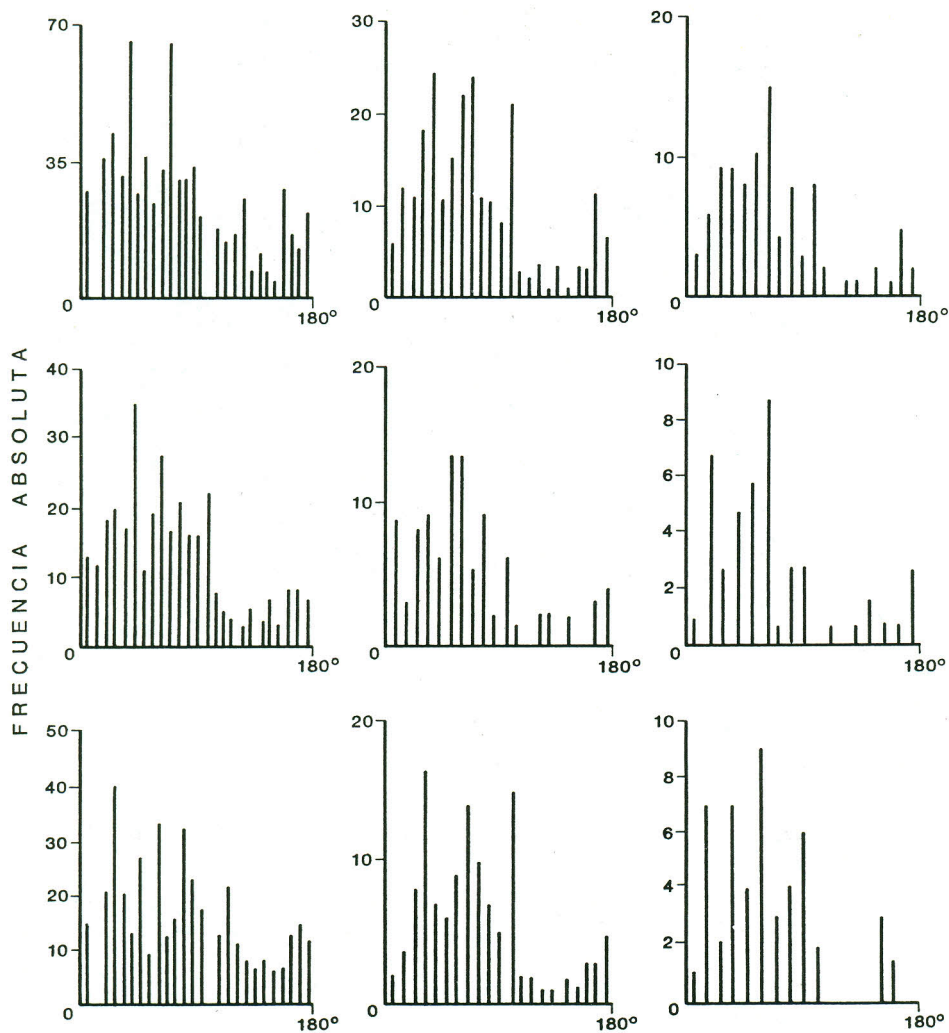


FIG.2- Histogramas correspondientes a las direcciones de las lineaciones obtenidas.

De izquierda a derecha: longitud de las lineaciones superior a 1, 2 y 3 Km.

De arriba a abajo: histogramas globales, de la mitad Norte y de la mitad Sur.

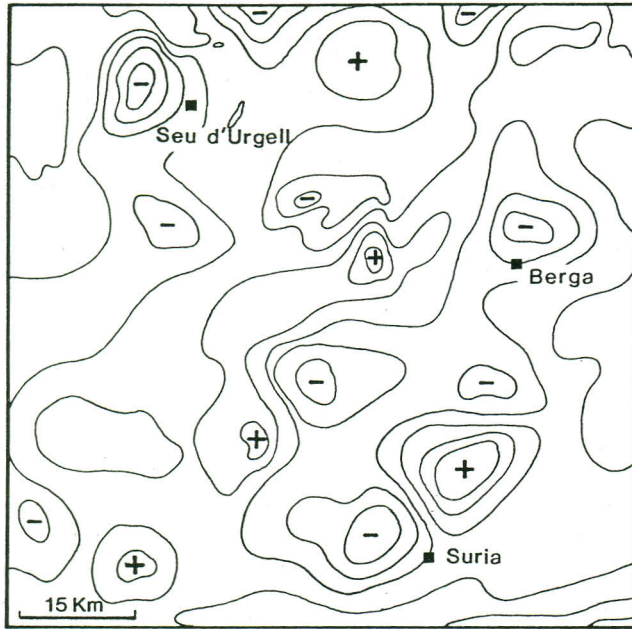
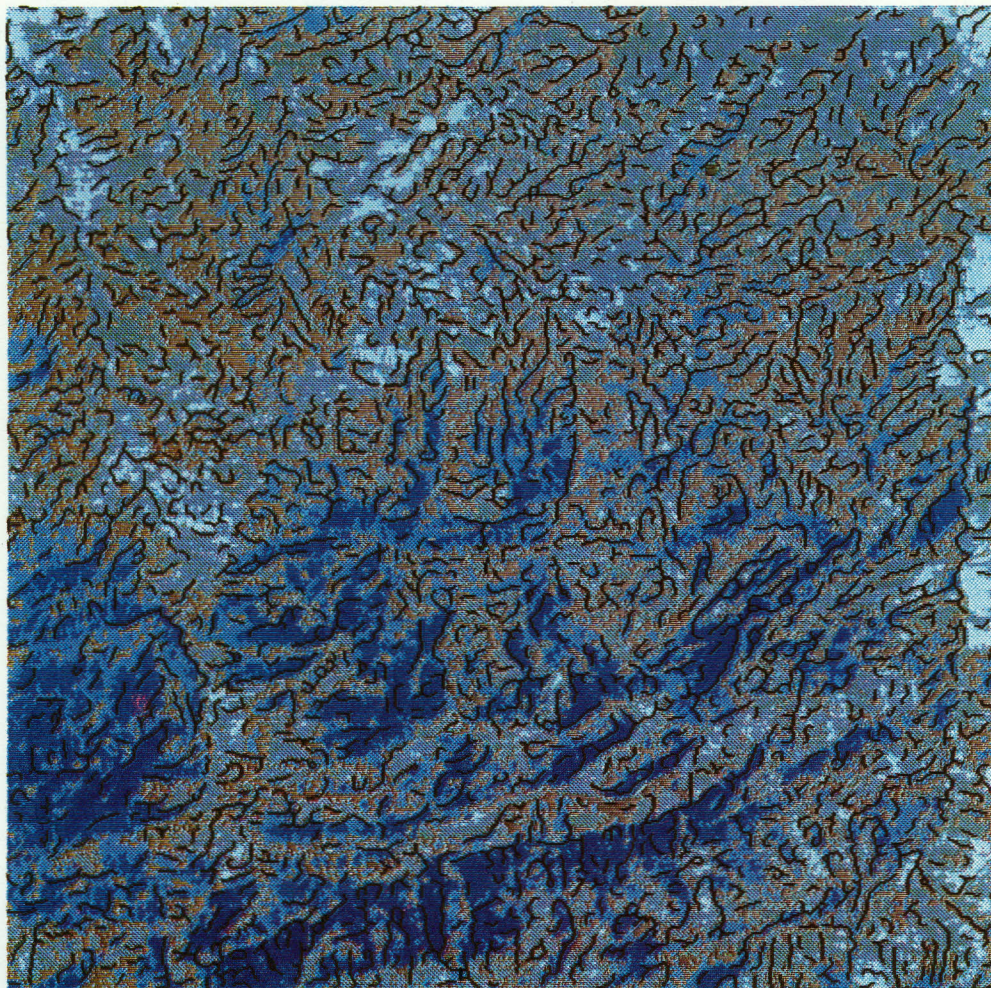


FIG.5- Localización de los máximos y mínimos gravimétricos del area de estudio.

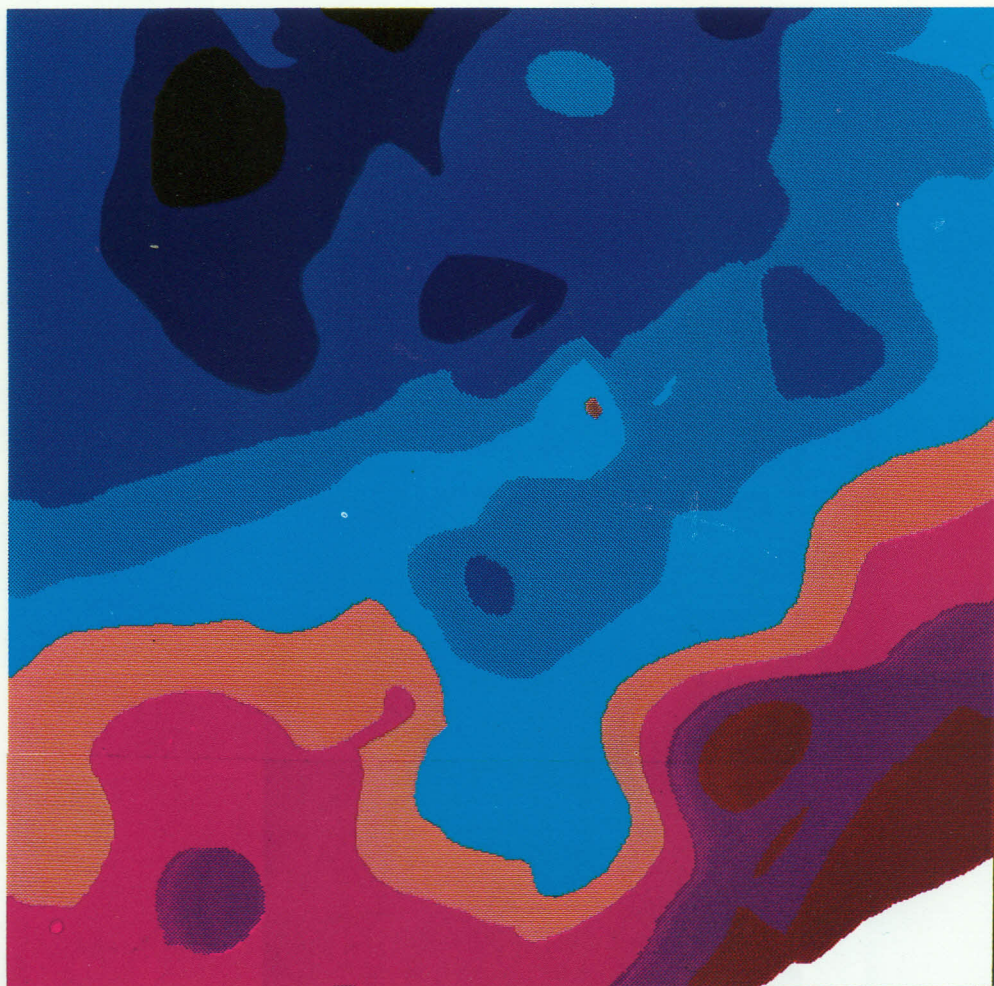




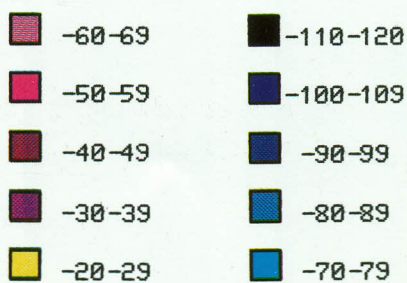
SUPERPOSICION DE LAS LINEACIONES OBTENIDAS EMPLEANDO FILTROS
LAPLACIANOS Y DE LA BANDA TM 6. SECTOR CORRESPONDIENTE A LA
SEGUNDA AREA TEST.



MAPA DE ANOMALIA DE BOUGUER CORRESPONDIENTE A LA SEGUNDA AREA
TEST. UNIDAD: mgal.



A. BOUGUER





BIBLIOGRAFIA

Aarnisalo, J., 1984; Image processing and integration of Geophysical, Landsat and other data as a tool for mineral exploration in glaciated precambrian terrain. Proc. Int. Symposium on Remote Sensing of the Environment, third thematic conference: Remote Sensing for exploration Geology, Colorado Springs, Colorado, pp. 107-128

Akima, H., 1978; A method of bivariate interpolation and smooth surface fitting for irregularly distributed data points. ACM transactions on Mathematical Software, 4(2): 148-159

Babock, E. A., 1974; A statistical analysis of photo-lineaments and joints, terrain paramatres and lineaments density near Lethbridge, Alberta. Proceedings of first international conference on the new basement tectonics. Salt Lake City, Utah. Utah Geol. Asociation Publ. 5:437-448

Cirilio, T. y Poscorelli, M., 1984; An interactive procedure for the analysis of linear elements detected on Landsat pictures: An application to Northern Mozambique. Remote sensing 1:273-280

Coupland, D. H. y Vincent, R. K., 1981; Authomatic linear recognition and analysis using computer program LIRA. Proceeding.... vol 1:499-508

Green, P. M., 1984; Digital image processing of integrated geochemical and geological information. Jour. Geol. Soc. 141 (5):941-949

Green, Ph y Bide P. J., 1985; Identification of mineral exoploration targets by use of integral digital images of integrated Earth Sciences information. NRC

Hobbs, W. H., 1904; Lineaments of the Atlantic border region. Bull. Geol. Soc. Am. 15: 483-

Koopmans, B. N., 1986; A comparative study of lineaments analysis from different remote sensing imagery over areas in the Benue Valley and Jos Plateau, Nigeria. Int. J. Remote Sensing 7(12):1763-1771

Lawson, C. L., 1972; Generation of a triangular grid with application to contour plotting. Jet Propulsion Laboratory. Section 914, Tech Mem no. 299

Misszalok, V., Burkhardt, R. and Wollensak, J., 1985; Quantitative monitoring of fundus changing. Ophtalmologica, 190:7-19

Moore, G. K., and Waltz, F. A., 1983; Objective procedures for lineament enhancement and extraction. Photogram. Engin. Remote sensing, 49:641 -

Offield T. W., Abbot E. A., et al. 1077; Structure mapping of enhancet LANDSAT images of southern Bazil: Tectonic control of mineralization and speculations on metallogeny. Geophysics, 42(3):482-500

Parsons A. J. and Yearley, R. J., 1986; An analysis of geological lineaments seen on LANDSAT MSS imagery. Int. J. Remote Sensing 7(12):1773-1782

Pous, J., Julià, R. y Solé Sugrañes L., 1986; Cerdanya basin geometry and its implications on the Neogene evolution of the Eastern Pyrenees. Tectonophysics, 129:355-365

Solé Sugrañes, L., 1978 a; Alineaciones y fracturas en el sistema catalán según las imágenes Landsat-1. *Tecniterrae* 22:6-16

Solé Sugrañes, L., 1978 b; Gravity and Compressive nappes in the Central Southern Pyrenees (Spain). *Am. J. Sci.* 278:609-637

Solé Sugrañes, L. y Souquet, P., 1980; La Chaîne alpine des Pyrenees. *Bull. Centr. Res. Expl. Prod. Elf-Aquitaine, Mem* 3:157-196

Yan, S. Y., Philipson, W.R. y Tang W. I., 1982; An analysis of SEASAT SAR for detection of geological linears. *Am Conf. on surveting and Maps and Am. Soc. of Photogrametry*, p.435-442

Yang T. S., Li, Z. R. y Li, L., 1983; The use of Hough transformation for detecting lineaments in satellite imagery. *3rd Asian Conf. in Rem. Sens. Dacca, Bangladesh. Proceedings F5,1-F5,8*