

ESTUDIO SISMOTECTÓNICO DE LA REGIÓN DE ARENAS DEL REY (PROV. GRANADA).

CAPOTE, Ramón. Dpto. Geomorfología y Geotectónica. Universidad Complutense. Ciudad Universitaria. Madrid  
SONZALEZ DE VALLEJO, Luis. Dpto. Geomorfología y Geotectónica. Universidad Complutense. Ciudad Universitaria Madrid-3.  
SKIPP, B.O. Soil Mechanics Ltd. Inglaterra.

RESUMEN

Con vistas al diseño sismorresistente de los taludes en las cortas proyectadas para explotar los lignitos de la región de Arenas del Rey y Padul (Provincia de Granada), se realizó un estudio sismotectónico de un área de 200 Kms. de radio alrededor de dichas localidades. La región está sometida a una intensa actividad neotectónica. Esta empezó con una distensión que, iniciada en el Tortonense, se prolongó hasta el final del Plioceno. Durante el Cuaternario se sabe que, la región fué sometida a una compresión principal - según la dirección NNW-SSE dentro de un contexto de aproximación de la placa africana hacia la Euroasiática. En la región de las cortas mineras proyectadas se reconocieron abundantes señales de esta actividad neotectónica destacando la existencia de una serie de accidentes de dirección E.W. que pasan por la alineación Tablate-Jayena-Fornes-Arenas del Rey-Venta de Zafarraya. Diversos criterios estructurales llevan a considerar la región dividida en grandes bloques corticales separados por líneas de falla. El movimiento diferencial de estos bloques, debido en parte a efectos de compensación isostática, parece ser responsable de la actividad sísmica de la región. El terremoto de Andalucía de 1884, puede relacionarse con la actividad de la alineación E.W. ya mencionada. La correlación de tectónica y distribución de terremotos permite diferenciar tres provincias sismotectónicas diferentes para esta región como base para el cálculo del riesgo sísmico.

## Introducción

La región de Arenas del Rey y Padul (Granada) ha sido objeto de sucesivas investigaciones geológico-mineras y de ingeniería minera, con el objeto de conocer las reservas de lignitos y turbas y sus condiciones de explotación. Así mismo se han estudiado los aspectos geotécnicos básicos de dichas explotaciones con el propósito de evaluar los ángulos de los taludes de las cortas proyectadas, los problemas de capacidad portante del terreno y otros factores geotécnicos significativos. La región de Arenas del Rey fué sacudida por un gran terremoto en 1884, causando gran destrucción, numerosas víctimas y efectos catastróficos en una extensa área. El epicentro de tal sismo se situó en las cercanías de Arenas y su intensidad fué de X en la escala de Mercalli. Con estos antecedentes era recomendable diseñar antisísmicamente los taludes de las cortas previstas para las explotaciones de lignitos de Arenas del Rey y de Padul, dado que la región podía ser afectada no solo por terremotos de gran intensidad sino también por actividad sísmica más o menos continua.

En 1981 se realizó el estudio sismotectónico que sirvió de base al cálculo dinámico de los taludes. Sus resultados han sido en parte recogidos en alguna publicación posterior, como la Hoja Piloto de Granada del Mapa Sismotectónico de España, publicada por el IGME en 1983, pero la mayor parte del trabajo permanece inédito. Se presenta en esta comunicación un resumen de las investigaciones llevadas a cabo y de los resultados obtenidos, tomando siempre los datos e interpretaciones contenidos en la memoria final del mencionado Estudio Sismotectónico.

Con objeto de definir los terremotos de diseño para ambas cortas se realizaron investigaciones sobre la Tectónica Regional, la Neotectónica Local, la Sismicidad Regional y la Sismotectónica Regional, pasándose después al cálculo del riesgo sísmico, la verificación de propiedades geotécnicas y el análisis dinámico de los taludes.

## Tectónica Regional

Para conocer la sismotectónica regional se realizó previamente un estudio tectónico regional de las principales unidades alpinas dentro de un área de 200 Km. de radio alrededor de Arenas del Rey y Padul, con objeto de establecer los condicionantes paleotectónicos de la actividad sísmica de la región. Se utilizaron principalmente las fuentes bibliográficas sobre el área complementadas con el estudio de fotos aéreas convencionales y de imágenes de satélite, así como varias campañas de campo en la región de Arenas del Rey y Padul.

El área investigada se localiza en el borde meridional de la depresión de Granada, que es una cuenca terciaria intermontana dentro de la Cordillera Bética. Dentro del área de 200 Km. entran además otras unidades geotectónicas. Entre las Cadenas Alpinas se incluyen la Cordillera Bética y las Cadenas del Norte de Africa. Entre las cuencas terciarias, en

tran en dicho área la Cuenca marginal del Guadalquivir y - un cierto número de cuencas intermontanas de la Cordillera Bética. Entran también el área cratónica del Macizo Ibérico y, fuera ya de la línea de costa, la Unidad del Mar de Alborán (Figura 1).

Las Cadenas Béticas y las del Rif, que constituyen el Arco de Gibraltar, fueron generadas en relación con la aproximación de las dos grandes placas Euroasiática y Africana a partir de los tiempos finales del Cretácico. El orógeno - Bético es de tipo ortotectónico y su estructura refleja un intenso acortamiento que acompañó a procesos de subducción y posterior colisión continental. (CAPOTE, 1978). La deformación afectó así primero a las Zonas Internas de la Cadena pero durante los períodos finales de la colisión (Mioceno), se extendió hacia el exterior y afectó a todo el borde meridional del Cratón Ibérico (Zona Prebética). Si se tiene en cuenta la distribución y composición de los vulcanismos neógenos, se pueden interpretar las últimas etapas de deformación en función de una zona de subducción en las Cadenas del Norte de Africa, con el plano de Benioff buzando hacia el Norte.

La creación de la Cuenca de Alborán, con su corteza adelgazada y el vulcanismo calcoalcalino relacionado, parece ligarse a una distensión fuerte. En conexión con esta distensión es probable que se formaran las cuencas terciarias intermontanas a partir del Mioceno Medio (Tortonienense). Sin embargo, dicha distensión quedó interrumpida en el Cuaternario antiguo, en una etapa tectónica que entra ya en los movimientos neotectónicos.

#### Neotectónica Regional

Es muy importante la actividad neotectónica de la región de Arenas del Rey y Padul. Toda ella se inscribe en un fenómeno de aproximación entre las placas Africana y Euroasiática. Si se calcula el polo euleriano del movimiento de ambas placas a partir de los desplazamientos relativos de las mismas respecto a la Placa Americana, que a su vez son conocidas mediante las bandas de anomalía magnética del fondo del Atlántico, se observa que Africa se mueve en sentido de acercarse hacia Iberia al menos desde hace 9 millones de años. Los mecanismos focales de los terremotos en el Arco de Gibraltar son coherentes con este sentido de movimiento y el cálculo de velocidades lineales da una tasa de aproximación en este área de 1,6 cm/año.

Esta aproximación determina que la actividad neotectónica en la zona de colisión entre placas, precisamente en la región Bética y de Alborán, sea intensa y extendida en un área que puede considerarse una provincia neotectónica diferente a otras de la Península como son la región costera catalana o la de la Cordillera Ibérica.

Los autores que han estudiado la evolución neotectónica en las Cadenas Béticas (BOUSQUET et al. 1976; GROUPE DE RECHERCHE NEOTECTONIQUE, 1977; SANZ DE CALDEANO, 1980; SANZ DE CALDEANO et al. 1981) reconocen varios períodos tectónicos

diferentes. Una primera etapa distensiva se inició a partir del Tortonicense y se prolongó hasta el Cuaternario Antiguo. La dirección de extensión fué primero según la dirección N-S y pasó después, en el Plioceno, a E-W. Se reactivaron en esta etapa antiguos desgarres que rejugaron como fallas normales y se generaron nuevas fallas de dirección E-W.

Las cuencas intermontanas se formaron en esta etapa, indicando grandes movimientos diferenciales e importantes hundimientos. También el vulcanismo de la región se desarrolló en esta etapa distensiva.

A la distensión sucedió a partir del Cuaternario antiguo una tectónica compresiva relativamente importante, durante la cual rejugaron las fallas existentes como desgarres o fallas inversas, según los casos, a la vez que se formaron pliegues de direcciones próximas a E-W. El análisis de microestructuras ha permitido reconocer una dirección principal de acortamiento NNW-SSE y otra de menor importancia E-W.

La deformación de niveles marinos en los litorales español y africano y la deformación suave de los depósitos cuaternarios continentales, mediante pliegues, fallas inversas y desgarres, atestiguan la prolongación de la compresión desde el Cuaternario antiguo a la actualidad, conservándose la misma dirección de acortamiento.

En la figura 1 se señalan algunas de las fallas que, según la bibliografía regional, han presentado movimientos intracuaternarios. Como puede apreciarse existen un cierto número de grandes desgarres, de más de 50 Km. de largo, que separan bloques corticales. Alguna de estas fallas, como el accidente del Negratín, son megafracturas a escala del orógeno, dispuestas longitudinalmente respecto al mismo. Otras fallas, como las de Alhama de Murcia, Palomares, Carboneras, Sorbas, Almería, etc. son desgarres pretortonenses reactivados como fallas normales durante la distensión y luego, nuevamente, como desgarres durante el Cuaternario. En algunas áreas no se ven grandes fracturas o accidentes y, en su lugar, se observan agrupaciones de fallas de longitudes inferiores a 50 Km. Un ejemplo en este sentido es el campo de fallas de la Depresión de Granada, formado principalmente por una familia de fallas NW-SE. La foto de satélite permite detectar otra familia E-W, justamente en el área de Alhama de Granada y Arenas del Rey.

#### Investigación Neotectónica Local.

Como parte del trabajo sismotectónico se investigó sobre el terreno un área de 50 Km. de largo por 35 Km. de ancho centrada en Arenas del Rey con objeto de localizar líneas de falla con actividad neotectónica y sus posibles asociaciones sísmicas. Se investigó este área por ser menos conocida que la de Padul donde se disponía previamente de un mejor conocimiento (SANZ DE GALDEANO, 1976 y 1980). Las imágenes de satélite ponen de manifiesto la existencia de alineaciones de dirección E-W, NE-SW y NW-SE. Los trabajos de

campo se dirigieron a comprobar la presencia de fallas próximas a las detectadas en las imágenes de satélite, interpretar dichas fallas genéticamente, comprobar su actividad cuaternaria y analizar las relaciones sismotectónicas entre el terremoto de Andalucía y la neotectónica de la región estudiada.

Del trabajo de campo se dedujo la existencia de una alineación E-W (Figura 2) que pasa por Tablate-Jayena-For-nes-Arenas del Rey-Venta de Zafarraya. Se trata de una línea de fallas de actividad reciente pues en diversos puntos corta a terrazas cuaternarias. El desplazamiento observado en algún punto es del orden de 20 cm. en zonas muy superficiales y el sentido es normal. También en otros puntos, en donde se esperaban el paso de trazas de falla según las imágenes de Satélite, se han visto a escala de afloramiento fallas. Se han observado sobre el terreno también fallas N-S y fallas NE-SW ó NW-SE. En las N-S se ha detectado actividad cuaternaria mientras que para las otras dos direcciones no existen pruebas concluyentes en este sentido.

También se han encontrado posibles señales de creep - de origen tectónico en el terreno. Concretamente en Alhama se han identificado agrietamientos y desplazamientos en obras de mampostería según una alineación E-W con sentido del deslizamiento levógiro.

#### Los grandes bloques corticales de la Región estudiada

En muchas regiones del Globo se ha observado que la actividad sísmica difusa intracontinental, se localiza principalmente en los contactos entre bloques corticales limitados por líneas de fractura y en ocasiones en la intersección de los límites de bloque.

En la región estudiada se observa que las grandes fallas con actividad neotectónica limitan bloques corticales. Esto es notorio en la región oriental de las Béticas, pero no tanto en sus Zonas Centrales y Occidentales, donde las fallas son en general de menores dimensiones. Sin embargo, en estos últimos casos es posible todavía delimitar bloques a partir de:

- Concentraciones de fallas superficiales pequeñas. Se supone que bajo una agrupación de fallas superficiales puede localizarse una falla cortical mayor.
- Datos gravimétricos. Algunos gradientes en las anomalías de Bouguer se localizan sobre posibles límites de bloques.
- Deformación de las líneas de costa. El cambio en el sentido de movimiento en los niveles deformados del Tirrenense reciente, puede ser debido a movimiento diferencial entre bloques corticales.

Se han definido así varios bloques y sub-bloques separados por líneas de fractura donde se concentra la actividad neotectónica. (Figura 3).

La compresión actual puede generar movimiento diferencial entre bloques a lo largo de dichas líneas, lo que en al

gún caso, como es el de la Depresión de Granada, puede ser favorecido por un diferente estado de compensación isostática. En efecto, en el bloque al Este de la falla de Padul, hay una anomalía de Bouguer de 150 mgals, que corresponde a la raíz de la Cordillera Bética, mientras al Oeste la anomalía es de -110 mgals. Una tendencia al levantamiento relativo del bloque oriental en la falla de Padul, puede esperarse si se tiene en cuenta no sólo la compresión sino también, la tendencia al equilibrio isostático.

### Sismotectónica

La información sísmica utilizada fué proporcionada -- por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Los terremotos listados se agruparon en una parte hasta el año 365 y en otra hasta 1979. El total de sismos listados fué de 1.186.

De acuerdo con el estudio tectónico se establecieron las divisorias entre las regiones o provincias sismotectónicas representadas en la figura 4. Estas divisorias responden a los fines de un estudio de riesgo sísmico. Una divisoria separa aproximadamente a las provincias 1 y 2, las unidades correspondientes a la Meseta y el conjunto Bético-Prebético respectivamente.

El contacto entre las zonas sismotectónicas 2 y 3 ha sido establecido en la línea de costa, aproximadamente en una línea recta. Bajo el punto de vista de la sismicidad se observa una distribución de epicentros diferentes en ambas provincias. Ahora bien, debido a que los terremotos ocurridos en el período anterior a la existencia de sismómetros instrumentales, situaban los epicentros en zonas de tierra y no de mar, es probable que la zona sismotectónica 3 sea deficiente en el registro de terremotos de las épocas pre-instrumentales y por ello podría pensarse que dicha divisoria no corresponde a una divisoria sismotectónica real. Desde el punto de vista tectónico, esta línea representa el límite entre dos unidades geotectónicas muy diferentes. Al Norte del Continente y al Sur la Cuenca de Alborán que, como ya se ha dicho, es un área de corteza adelgazada y por ello desde el punto de vista sismotectónico es de características intermedias entre la corteza oceánica y la continental. Por todo ello, la línea de costa coincide con un límite entre unidades geotectónicas distintas.

La distribución de epicentros no ha mostrado ninguna lineación tectónica de clara atribución sísmica, por lo que se decidió distribuir los terremotos a lo largo de la zona sismotectónica 2, en vez de asociarlos estrictamente a fallas determinadas. Todo ello con fines de cálculo del análisis del riesgo. Sin embargo, se consideró conveniente hacer una excepción para el caso de la región cercana a Granada capital, donde es notoria la concentración de epicentros. Aunque es muy posible que en este caso exista una clara subjetividad histórica en la asignación de epicentros a un centro de gran población, sin embargo el significado de su situación en relación a su proximidad con Padul y Arenas del Rey, no puede ser ignorado.

En conclusión, se estableció un centro sismotectónico (punto 4) en las cercanías de Granada. Esta concentración de sismos en el denominado punto 4 está cercano a la intersección de fallas corticales del modelo geodinámico (figuras 3 y 4). Es posible que dicho centro de actividad sísmica esté relacionado con movimientos diferenciales entre los bloques afectados.

Del exámen de las profundidades focales dadas en las listas sismológicas consultadas, se ha observado que existen datos muy limitados en la mayoría de los terremotos, incluso en muchos de ellos no se conoce su hipocentro, y en otros, se ha puesto una profundidad de 33 Km. de tipo convencional. No obstante, de la consideración de datos geodinámicos, se han tomado las siguientes profundidades medias:

Zona sismotectónica	Profundidades	
	IGN	Datos corticales
1	50 km	25 km
2	25 km	25 km
3	50 km	20 km
4	10 km	10 km

Estas profundidades se han atribuido en función de los espesores de corteza. Así la zona 1 corresponde a la Meseta con una corteza continental normal B de espesor medio aproximado de unos 35 km., pero los hipocentros se sitúan a la parte más baja de la corteza superior, es decir a unos 25 km. En la zona 2 se suponen los mismos criterios. La zona 3, situada en el mar de Alborán, los datos de IGN dan 50 km, es decir, que deben considerarse como superficiales y originados en la corteza. Puesto que ésta no tiene un espesor mayor de 20 km, podemos tomar este último valor como la máxima profundidad. Con respecto al punto 4, es evidente que hay fallas que están funcionando en régimen friccional en superficie. Si estas fallas son sísmicas la profundidad media debe ser del orden de 10 km.

Los estudios de riesgo sísmico efectuados en base a estos datos sismotectónicos, así como el diseño dinámico de las cortas han sido publicados por GONZALEZ DE VALLEJO et al. (1984)

### Conclusiones

Como síntesis de los resultados obtenidos en este trabajo se destacan los siguientes:

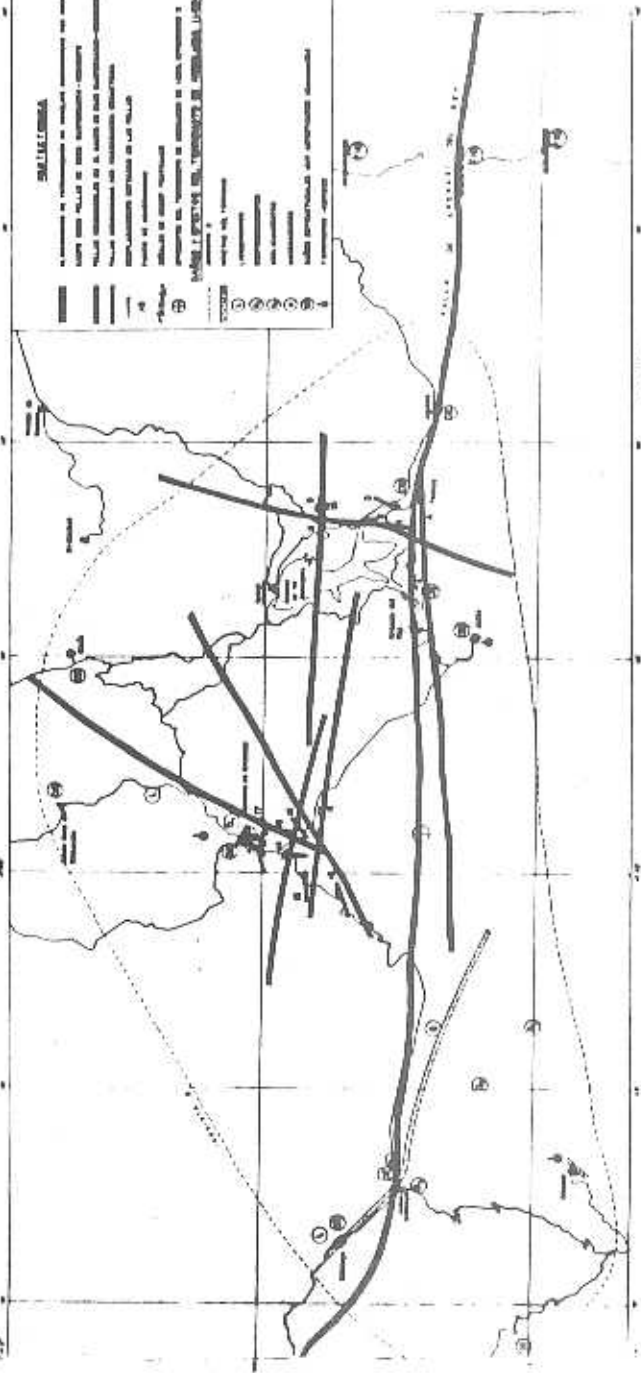
- Se propone un modelo geotectónico para la interpretación de la estructura cortical de la región estudiada. Este modelo responde a una compartimentación en grandes bloques separados por líneas de fractura. Datos geológicos de superficie, sísmicos y gravimétricos apoyan esta hipótesis.





**DELEGACION**

- 1. Línea de ferrocarril
- 2. Línea de ferrocarril de vía estrecha
- 3. Línea de ferrocarril de vía ancha
- 4. Línea de ferrocarril de vía mixta
- 5. Línea de ferrocarril de vía normal
- 6. Línea de ferrocarril de vía especial
- 7. Línea de ferrocarril de vía experimental
- 8. Línea de ferrocarril de vía provisional
- 9. Línea de ferrocarril de vía definitiva
- 10. Línea de ferrocarril de vía permanente
- 11. Línea de ferrocarril de vía temporal
- 12. Línea de ferrocarril de vía especial de transporte
- 13. Línea de ferrocarril de vía especial de pasajeros
- 14. Línea de ferrocarril de vía especial de mercancías
- 15. Línea de ferrocarril de vía especial de transporte de pasajeros
- 16. Línea de ferrocarril de vía especial de transporte de mercancías
- 17. Línea de ferrocarril de vía especial de transporte de pasajeros y mercancías
- 18. Línea de ferrocarril de vía especial de transporte de pasajeros y mercancías y transporte de pasajeros
- 19. Línea de ferrocarril de vía especial de transporte de pasajeros y mercancías y transporte de pasajeros y mercancías
- 20. Línea de ferrocarril de vía especial de transporte de pasajeros y mercancías y transporte de pasajeros y mercancías y transporte de pasajeros y mercancías



FERROVIARIO





- Se identifica una alineación de fallas Este-Oeste, en la zona de Arenas del Rey, que podría ser la responsable del Terremoto de Andalucía de 1884 (MSK IX).
- La regionalización sismotectónica efectuada ha aportado la información básica para el cálculo del riesgo sísmico de las explotaciones mineras de la zona.

---

#### Agradecimientos

Los autores agradecen las facilidades dadas por la Empresa Nacional Adaro y la Empresa Nacional de Electricidad para la publicación de este trabajo.

#### Bibliografía

- Bousquet, J.C.; Montenat, C. y Philip, H. (1978) LA EVOLUCION TECTONICA RECIENTE DE LAS CORDILLERAS BÉTICAS ORIENTALES.- Reun.Geod. Cordillera Bética y Mar de Alborán (1976). Univ. Granada.:59-78.
- Capote, R. (1978) TECTONICA ESPAÑOLA. Seminario sobre criterios sísmicos para instalaciones nucleares y obras públicas. Madrid Asoc.Esp.Ing.Sism.: 1-30.
- González de Vallejo, L., Eldred, P. and Oteo, C. (1984) OPEN PIT MINE DESIGN IN SEISMIC AREAS. Institution of Mining and Metallurgy. Earthquake, Blasting and vibrations in surface mining. London.
- Groupe de Recherche Neotectonique (1977) L'HISTOIRE TECTONIQUE RECENTE (TORTONIEN A QUATERNAIRE) DE L'ARC DE GIBRALTAR ET DES BORDURES DE LA MER D'ALBORAN. Bull.Soc.Geol. - France.(7) 19: 575-614.
- Sanz de Galdeano, C. (1980) LA NEOTECTONICA DEL NORTE DE LA DEPRESION DE GRANADA. Estudios Geológicos 36: 255-261. Madrid
- Sanz de Galdeano, C. y Estevez, A. (1981) ESTRIACIONES TECTONICAS EN CANTOS DE CONGLOMERADOS. SU ESTUDIO EN LAS DEPRESIONES DE GRANADA Y GUADIX-BAZA. Estudios Geológicos 37 : 227-232.

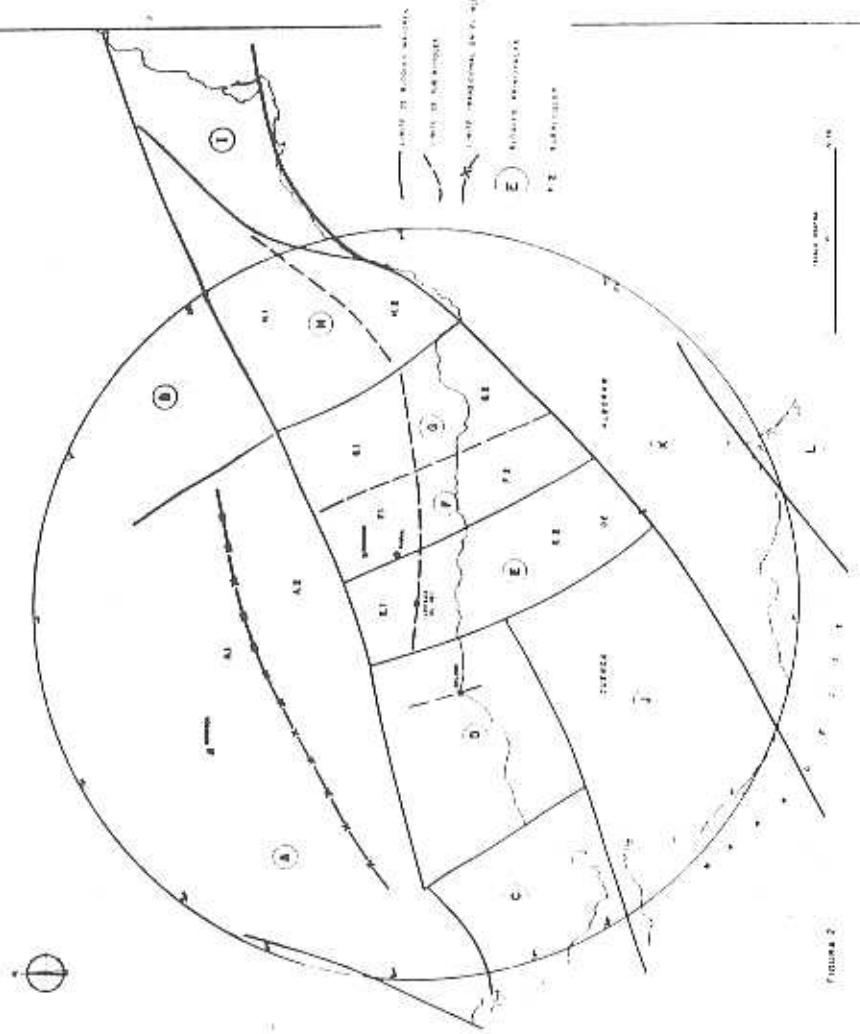


FIGURA 2



