



**ABRIR CAPÍTULO 10**



Fotografía 10.5: Vista de un corte transversal a un frente de cabalgamiento en el interior del Arco de Alcaraz (al norte de Riopar). En este área se han registrado planos de falla estriados que se acomodan a un tensor de esfuerzos compresivo ( $\sigma_1$  horizontal y dispuesto NO-SE).  
Nótese las modificaciones en el ángulo de buzamiento de las series liásicas.

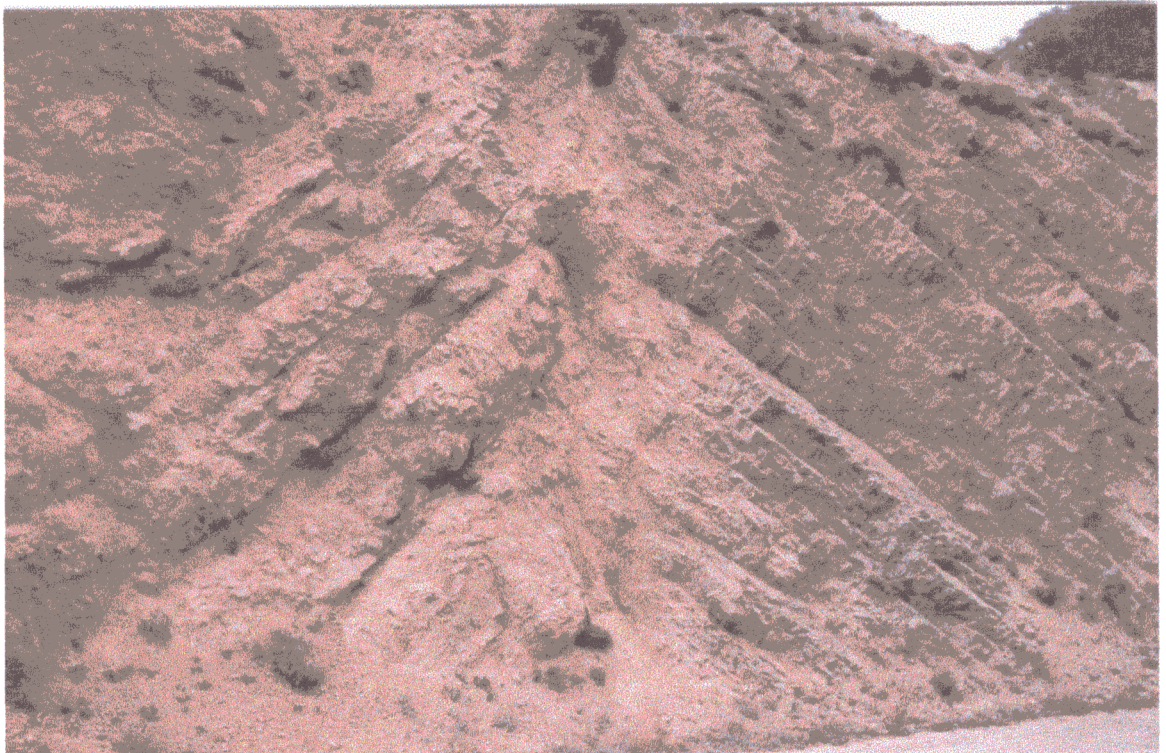


Fotografía 10.6: Vista de un corte transversal a un frente de cabalgamiento en el interior del Arco de Alcaraz (al norte de Ayna). De nuevo, en este área se han registrado planos de falla estriados que se acomodan a un tensor de esfuerzos compresivo ( $\sigma_1$  horizontal y dispuesto NO-SE). Nótese la existencia de fracturas sintéticas y antitéticas con respecto al frente.





Fotografía 10.7: Plano de falla normal localizado en las proximidades de un frente de cabalgamiento en el interior del Arco de Alcaraz (al norte de Riopar). En este área se han registrado planos de falla estriados que se acomodan a un tensor de esfuerzos extensivo ( $\sigma_1$  vertical y  $\sigma_2$  dispuesto NO-SE).



Fotografía 10.8: Plano de falla normal localizado en la zona más distal al frente de un cabalgamiento en el interior del Arco de Alcaraz (al sur de Alcaraz). La falla está orientada del mismo modo que el frente inverso. En este área se han registrado planos de falla estriados que se acomodan a un tensor de esfuerzos extensivo ( $\sigma_1$  vertical y  $\sigma_2$  dispuesto NO-SE).

mejor de expresarlo. Esta expresión se consigue mediante la superposición de las variaciones bien de la *máxima* (“ $\sigma_{\text{horizontal máx.}}$ ”) y *mínima* (“ $\sigma_{\text{horizontal mín.}}$ ”) *compresión en la horizontal* para cada población o subpoblación (recuérdese que en numerosas estaciones se ha definido la existencia de más de una población), o bien de los dos ejes principales de esfuerzo situados en la horizontal. En este trabajo se ha optado por la segunda opción, debido a las condiciones más restrictivas que implica el uso del *Método de Inversión de Esfuerzos*.

Así, cada *moda principal* está caracterizada por una serie de cuatro gráficos, y una parte considerable del *análisis poblacional de fallas* desarrollado se resume mediante las doce representaciones correspondientes. La *Tabla 10.4* resume las orientaciones medias de las trayectorias que caracterizan, por tanto, al *tensor regional*.

| Parámetro                         | MODA | ACIMUT PROMEDIO |
|-----------------------------------|------|-----------------|
| $E_y$                             | 1    | N124°E          |
| $\sigma_{\text{horizontal máx.}}$ | 1    | N124°E          |
| $\sigma_{\text{horizontal mín.}}$ | 1    | N38°E           |
| $E_y$                             | 2    | N35°E           |
| $\sigma_{\text{horizontal máx.}}$ | 2    | N37°E           |
| $\sigma_{\text{horizontal mín.}}$ | 2    | N123°E          |
| $E_y$                             | 3    | N21°E           |
| $\sigma_{\text{horizontal máx.}}$ | 3    | N27°E           |
| $\sigma_{\text{horizontal mín.}}$ | 3    | N106°E          |

**Tabla nº 10.4.** Orientaciones medias deducidas para cada una de las subdivisiones consideradas y para el Modelo de Deslizamiento ( $E_y$ ) y el Método de Inversión de Esfuerzos ( $\sigma_{\text{horizontal máximo y mínimo}}$ ).

Los cuatro gráficos representativos de la MODA 1 (*figuras 10.8, 10.9, 10.10 y 10.11*) se definen mediante una serie de trayectorias

relativamente homogéneas y consecuentes entre sí. Sin embargo, es posible destacar tres cuestiones a partir de su observación: (1) existe una zona anómala en el sector central del área de estudio que tiende a refractar dextrógira y/o levógiramente las trayectorias: *zona de refracción*; (2) las trayectorias que definen las variaciones de “ $E_y$ ” y de “ $\sigma_{\text{horizontal máx.}}$ ” tienden a disponerse ortogonales al Frente Prebético (arqueado) de Alcaraz; y (3) existe una tendencia de las trayectorias a disponerse NO-SE en el este del área considerada y ONO-ESE en el sector más occidental. De los cuatro gráficos, sin duda el más ilustrativo es el que considera la superposición de “ $\sigma_{\text{horizontal máx.}}$ ” y “ $\sigma_{\text{horizontal mín.}}$ ”, las mayores restricciones del *Método de Inversión de Esfuerzos* permiten una observación más nítida de las tres conclusiones anteriores. Por lo que se refiere a los gráficos obtenidos para la MODA 2 (*figuras 10.12, 10.13, 10.14 y 10.15*), estos son totalmente equivalentes a los conseguidos desde la MODA 1. Evidentemente, ahora las anteriores disposiciones de “ $E_y$ ” y de “ $\sigma_{\text{horizontal máx.}}$ ” se corresponden con las nuevas de “ $\sigma_{\text{horizontal mín.}}$ ”, y viceversa. Con estas nuevas trayectorias se contrastan satisfactoriamente las conclusiones previas numeradas como 1) y 3), difuminándose un tanto la 2). Sobre este último comentario cabe argumentar que Martín-Velázquez *et al.* (1996) y Rodríguez-Pascua (1997) han analizado el estado de paleoesfuerzos para el sector del Frente Prebético más oriental, del cual no se han obtenido registros para este trabajo. Sus conclusiones básicas definen dos estados de esfuerzos tensoriales coetáneos caracterizados por compresiones horizontales máximas dispuestas N15°E y N102°E. Estos valores son coherentes con la idea apuntada previamente según la cual *las trayectorias de esfuerzos tienden a disponerse de manera ortogonal al Frente Prebético*.



Esta segunda serie de representaciones permite localizar un área donde la *refracción* de las trayectorias de esfuerzos es, aparentemente, más intensa: cabecera de las cuencas fluviales de los ríos Jabalón y Azuer (Cuenca Alta del Guadiana). Permite, además, contrastar la existencia de refracciones del *tensor* a favor de fracturas o sistemas de fracturas penetrativos. Ejemplos de esta acomodación del *tensor regional* a directrices estructurales penetrativas son las sucedidas en el sistema de fallas NNE-SSO próximo a las localidades jienenses de Linares y a La Carolina (figura 10.4; I.G.M.E., 1982a).

Por último, la MODA 3 proporciona mapas de trayectorias (figuras 10.16, 10.17, 10.18 y 10.19) sensiblemente diferentes a los ocho anteriores. Sin embargo, ante su observación y los comentarios previos, cabe ahora preguntarse si esta MODA 3 no representa una *refracción* máxima del *tensor regional* o *campo bético*. Su escaso porcentaje de representación (5,7% → 250 planos) y la similitud de sus trayectorias con las de tendencia más “norteadas” definidas a partir de las MODAS 1 y 2 obligan a que las consideremos de este modo al menos para las observables en el sector central de la zona de estudio.

En este sentido, el frente más norteadado del Arco de Alcaraz (Sierra de Cazorla), estas trayectorias norte-sur podrían relacionarse con la propia estructuración de los frentes de cabalgamiento hacia el oeste y con fracturas extensionales asociadas ortogonales a la *dirección de transporte tectónico*. En cualquier caso, esta estructuración del Frente Prebético es consecuente con la atenuación del denominado aquí como *campo bético*, con lo cual la hipótesis anterior no se ve afectada sino *localmente complementada*, tal y como sucedía con la acomodación de la MODA 2 al sistema de fallas NNE-SSO próximo a Linares y a La Carolina. No es

posible asignar un origen preneotectónico para estas mesoestructuras frágiles ya que esta MODA 3 se ha definido a partir de registros obtenidos (véanse las tablas y los anexos correspondientes) sobre materiales de edad paleozoica, jurásica, miocena (inferior y superior).

En resumen, el análisis de la expresión frágil más superficial registrable en todo el *Antepaís Bético* y asignable a planos de fallas estriados (las diaclasas constituirán el otro elemento mesoestructural que permitirá caracterizar esta expresión superficial frágil) permite concluir tres modos de atenuación diferentes del *tensor regional* o *campo bético* provocado por la convergencia de las placas africana y euroasiática en el sur de la Península Ibérica. El menor confinamiento del medio rocoso analizado en comparación con su expresión más profunda favorece una expresión frágil (de carácter extensional) de la atenuación, mucho más aleatoria que lo predecible para profundidades mayores (véanse fotografías 10.5-10.8). En este sentido, la existencia de discontinuidades con un cierto grado de penetratividad (ante este grado de confinamiento) puede significar la activación de cauces preferentes a favor de los cuales la orientación del *tensor regional* se canaliza y, por ende, se modifica (R. Stein, com. pers.<sup>10</sup>).

Este menor grado de confinamiento, junto con la existencia de discontinuidades estructurales de entidad suficiente, permite una explicación a las numerosas permutaciones coaxiales de los ejes principales de esfuerzos y a sus continuas modificaciones espaciales. En nuestra opinión, no es posible asignar un origen distinto para cada uno de los tres estados tensoriales (modas) de ámbito regional definidos, máxime cuando se considera que su

---

<sup>10</sup> Dr. Ross Stein (U.S. Geological Survey; Menlo Park, U.S.A.).

incidencia sobre el *antepaís* ha sido coincidente en el tiempo (afectando a materiales con edades muy diferentes): la dinámica de las placas litosféricas no parece ser capaz de definir distintos regímenes tectónicos para periodos de tiempos tan restringidos (Mioceno superior-Actualidad). En este sentido, autores como Philip y Cisternas (1983), Rebañ *et al.* (1992), Medina (1995), o Sassi *et al.* (1997) han propuesto explicaciones similares a la mostrada aquí ante situaciones semejantes de aparición de permutaciones coaxiales de los ejes principales de esfuerzos. No parecen existir dudas sobre el origen mayoritario de las evidencias mesoestructurales frágiles registrables tanto en los materiales que conforman el basamento hercínico como los que constituyen la cobertera carbonatada mesozoica del Campo de Montiel: **origen neotectónico**.

Además de estas explicaciones posibles para solucionar la problemática provocada por las permutaciones de los ejes principales y su variación espacial, en este trabajo se propone un nuevo elemento que sin duda ha debido colaborar con los expuestos anteriormente, quizás en mayor medida que cualquiera de los dos previos. No se trata de un aspecto desligado de los anteriores, sino una consecuencia directa de la atenuación del propio *tensor regional*: todas las variaciones de trayectorias suceden dentro de un *entorno flexural complejo* (véase apartado 11.3).

Distintas flexuras de órdenes diversos (longitudes de onda variables) se alternan por todo el *Antepaís Bético*. Esto implica incrementos o descensos locales de aquel *grado de confinamiento* citado. Así, las conclusiones deducibles de los datos registrados en el extradós de estas flexuras puede potencialmente variar de las proporcionadas a partir del análisis de datos registrados en el intradós de la flexura (Price y Cosgrove, 1990). De este modo,

puede imaginarse la complejidad de un entorno geológico donde caben los efectos de la ausencia general de presiones de confinamiento, de discontinuidades penetrativas, y de sucesivas flexuras corticales.

Quizás sea la *figura 10.20* la más adecuada para contrastar esta incidencia flexural en el modo de atenuación de la deformación neotectónica. De manera espectacular, un mapa de isovalores del parámetro “*R*” ( $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ ) colabora a contrastar esta idea. Si se considera que la permutación de los ejes es factible sólo cuando existen valores de “*R*” distintos de cero y próximos a la unidad, la figura mostrará una relación directa entre las flexuras positivas (en las cuales el extradós de la misma genera un relieve positivo) y áreas donde las permutaciones son posibles.

En las proximidades a los ejes de las flexuras positivas habrán de predominar los movimientos extensionales, por el contrario, sobre el eje de las flexuras negativas predominarán las fracturas compresivas y los valores de “*R*” más bajos. Así, es posible entender la disposición preferente de “valores mínimos” al norte de la provincia de Ciudad Real (*figuras 10.35 y 10.20*): la Depresión de la Llanura Manchega y su prolongación hacia el oeste podría ser la causante de este sector no favorable a las permutaciones de los tres ejes de esfuerzos principales.

Como puede comprobarse, gran parte del *Antepaís Bético* define valores de “*R*” distantes de cero → entorno geodinámico favorable para la existencia de permutaciones axiales. Igualmente, en esta misma figura es posible visualizar la existencia de bandas o “corredores” NE-SO y NO-SE en los cuales el valor de “*R*” se aproxima a cero. Así, grandes áreas dispuestas NE-SO o ENE-OSO como los Montes de Toledo, el Campo de Montiel, la Sierra de Alcudia, o



el Campo de Calatrava son susceptibles de registrar cualquiera de las tres modas. Resulta ahora sumamente revelador comprobar como dentro de una de estas flexuras positivas principales (Sierra de Alcudia-Campo de Calatrava) las isolíneas definen directrices secundarias próximas a E-O o a N-S, recuérdense las tendencias N-S y E-O de las trayectorias refractadas. También resulta del mismo modo recordar donde ha sucedido la extrusión de los productos ígneos que representan la Región Volcánica Central Española: el volcanismo no progresó más al este o al oeste de estos límites. La última contrastación fundamental que propone este mapa afecta a la distribución de los epicentros registrados por el I.G.N. para este sector, representada en la *figura 10.21*.

Queda evidenciada la estrechísima relación existente entre las zonas donde actualmente se resuelve la actividad deformacional del *tensor regional* y las zonas que definen los estados tensionales más intensos → los cuales no permiten las permutaciones de los ejes (esto supone una contrastación positiva de los resultados concluidos sobre la caracterización espacial y temporal de estado de paleoesfuerzos con respecto al estado tensional registrable en la actualidad). En este sentido, es destacable la banda o “corredor” NO-SE que atraviesa el límite provincial de Ciudad Real y Albacete.

Tal y como se mostrará en el apartado siguiente, el diaclasado tiende a contrastar de manera afirmativa la existencia de este “corredor de deformación”, ya que en esta zona se localizan los registros que son coherentes con la atenuación de tensores de esfuerzos locales más compresivos: *Dominio B* (*figura 10.22*).

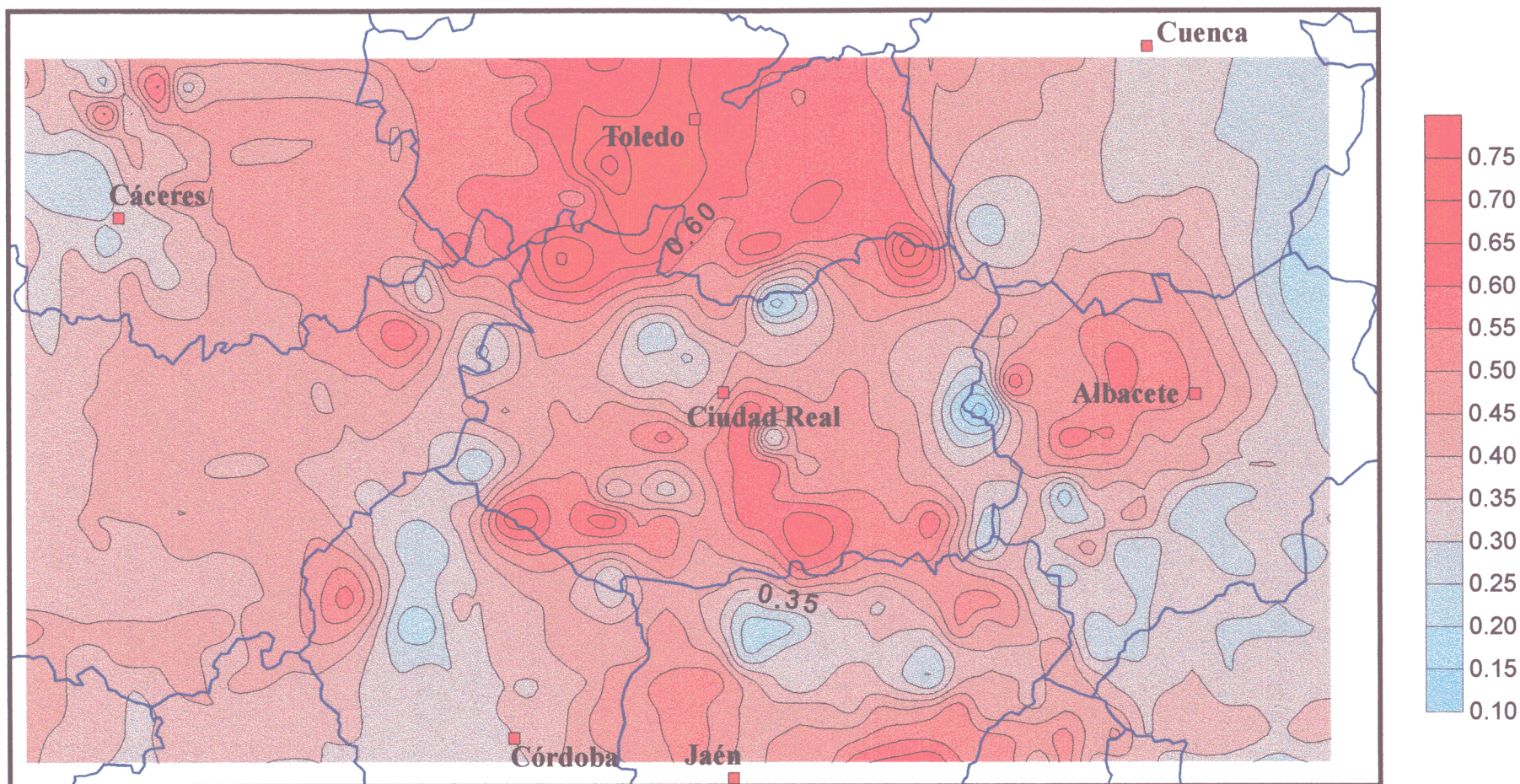
Este *tensor regional* ha reactivado (para litologías de edades diferentes), preferentemente, fallas de tipo direccional-normal. Fallas normal-direccionales, direccionales-inversas, direccionales

puras (desgarres), normales puras e inversas puras, por este orden, le siguen en frecuencia. Tal predominio de fracturas direccionales y, también, la existencia de fallas normales e inversas consecuentes, junto con la distribución espacial de los ejes de esfuerzo principales, permite caracterizar al *campo bético* como un estado tensional resuelto mediante una deformación coaxial o pura *compresiva en régimen de desgarre*. Los planos de falla activados por esta deformación, ante el predominio de movimientos direccionales, son preferentemente subparalelos en cada uno de los tres casos a la disposición espacial de la *máxima compresión horizontal*.

En este mismo contexto, se han realizado mapas de isovalores del parámetro “*K*” (*figura 10.23*), así como de los valores angulares del buzamiento (*figura 10.24*) y cabeceo medios (*figura 10.25*). El primer mapa y el último evidencian (*Tabla 10.3*) el predominio absoluto de una secuencia normal para las fallas y, dentro de ésta, de fallas direccionales-normales ( $K' > 1$ ). Las zonas donde los valores del ángulo de cabeceo son bajos predominan los movimientos direccionales y los valores de “*K*” más elevados. La *figura 10.24* permite deducir, *grosso modo*, donde se localizan los tensores de esfuerzos más compresivos dentro del contexto general de *compresión en régimen de desgarre*. Sobre esta última es posible superponer la *figura 10.21* y concluir que, aparentemente, la sismicidad sucede de manera preferencial en aquellas zonas donde el estado de paleoesfuerzos define tensores de esfuerzos locales si no más compresivos si menos permutables.

(X:170000, Y:4449900)

(X:660000, Y:4449900)



(X:170000, Y:4175100)

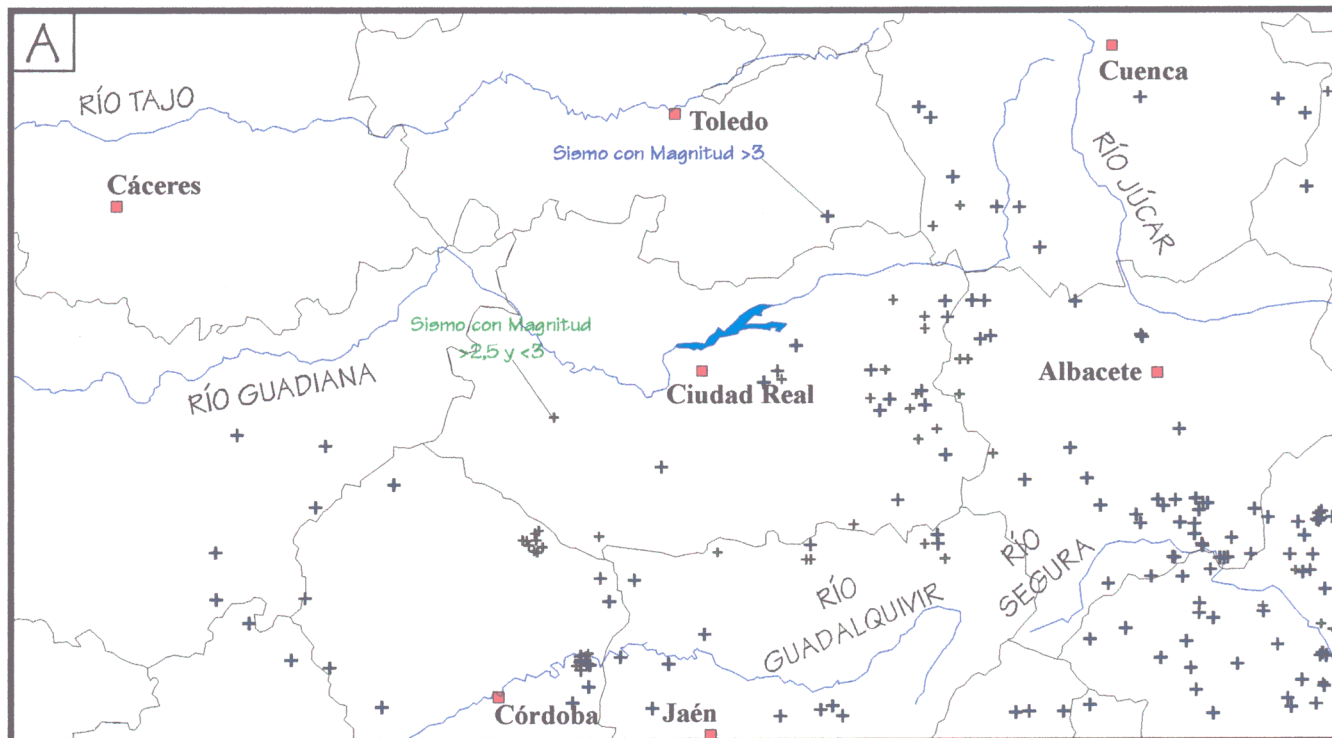
(X:660000, Y:4175100)

Figura 10.20: *Mapa de isovalores interpolados* de todos los valores posibles deducidos para el parámetro "R" (para su realización se han considerado las soluciones propuestas por el *Método de Inversión de Esfuerzos* para todos los planos de falla estriados, sin distinción por modas).



(X:170000, Y:4449900)

(X:660000, Y:4449900)



(X:170000, Y:4175100)

(X:660000, Y:4175100)

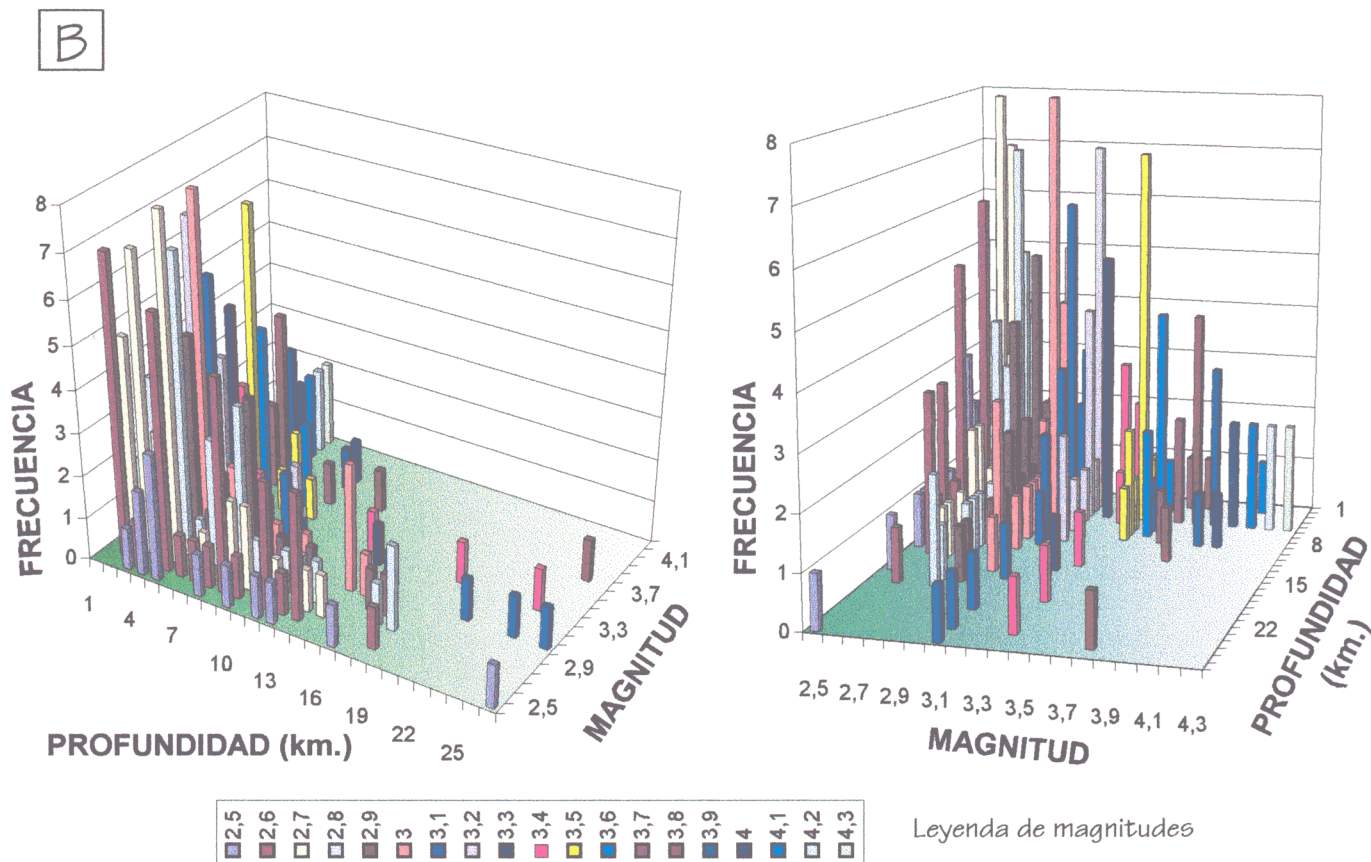
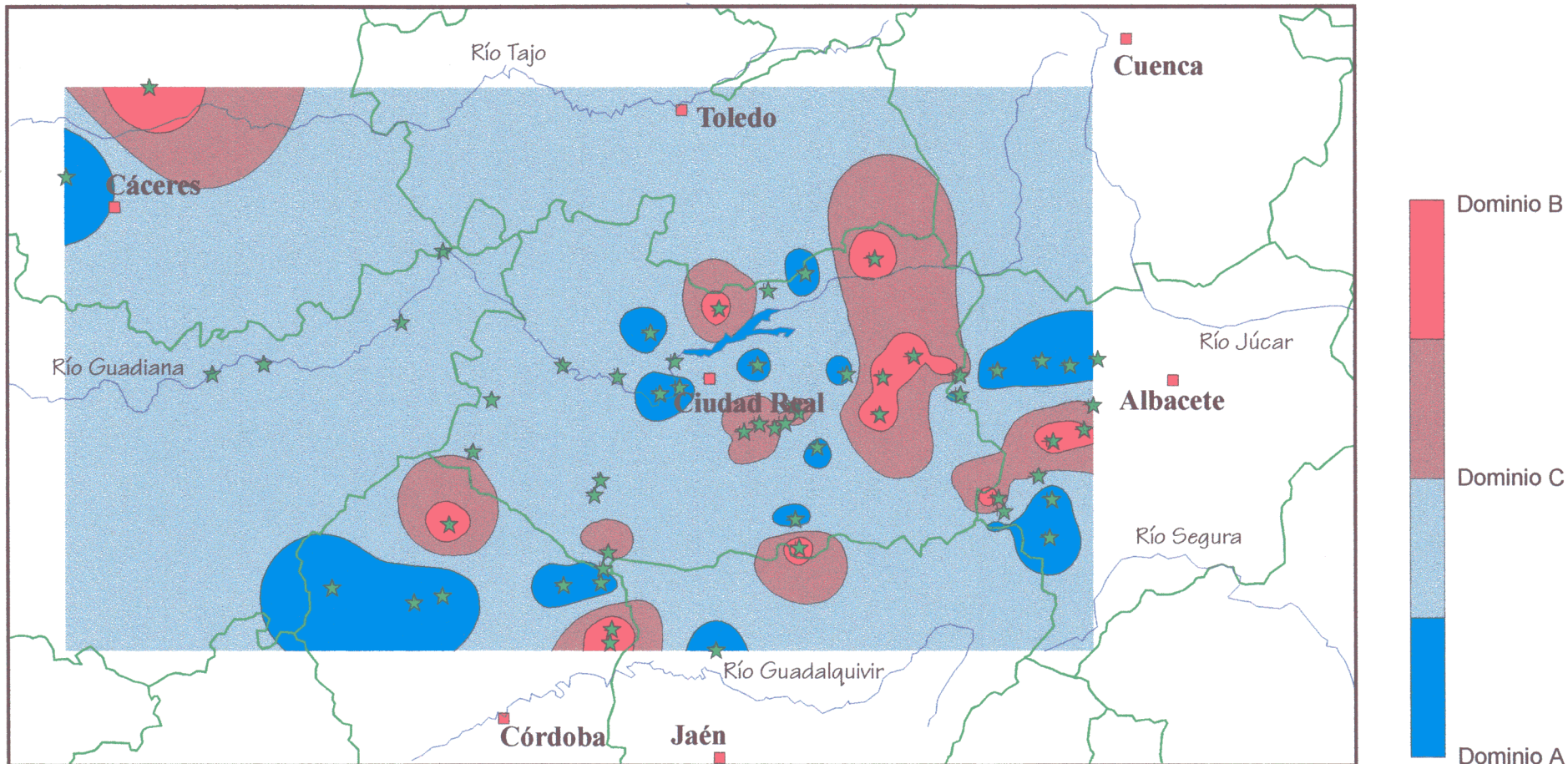


Figura 10.21: (A) Localización de los epicentros registrados por el I.G.N. en el área de estudio (datos hasta Diciembre de 1996). Se ha distinguido entre aquellos que poseen una magnitud  $>2,5$  y  $<3$  y los que superan la magnitud 3. (B) Representación gráfica de la profundidad, magnitud y frecuencia de estos mismos sismos según dos perspectivas diferentes.



(X:170000, Y:4449900)

(X:660000, Y:4449900)



(X:170000, Y:4175100)

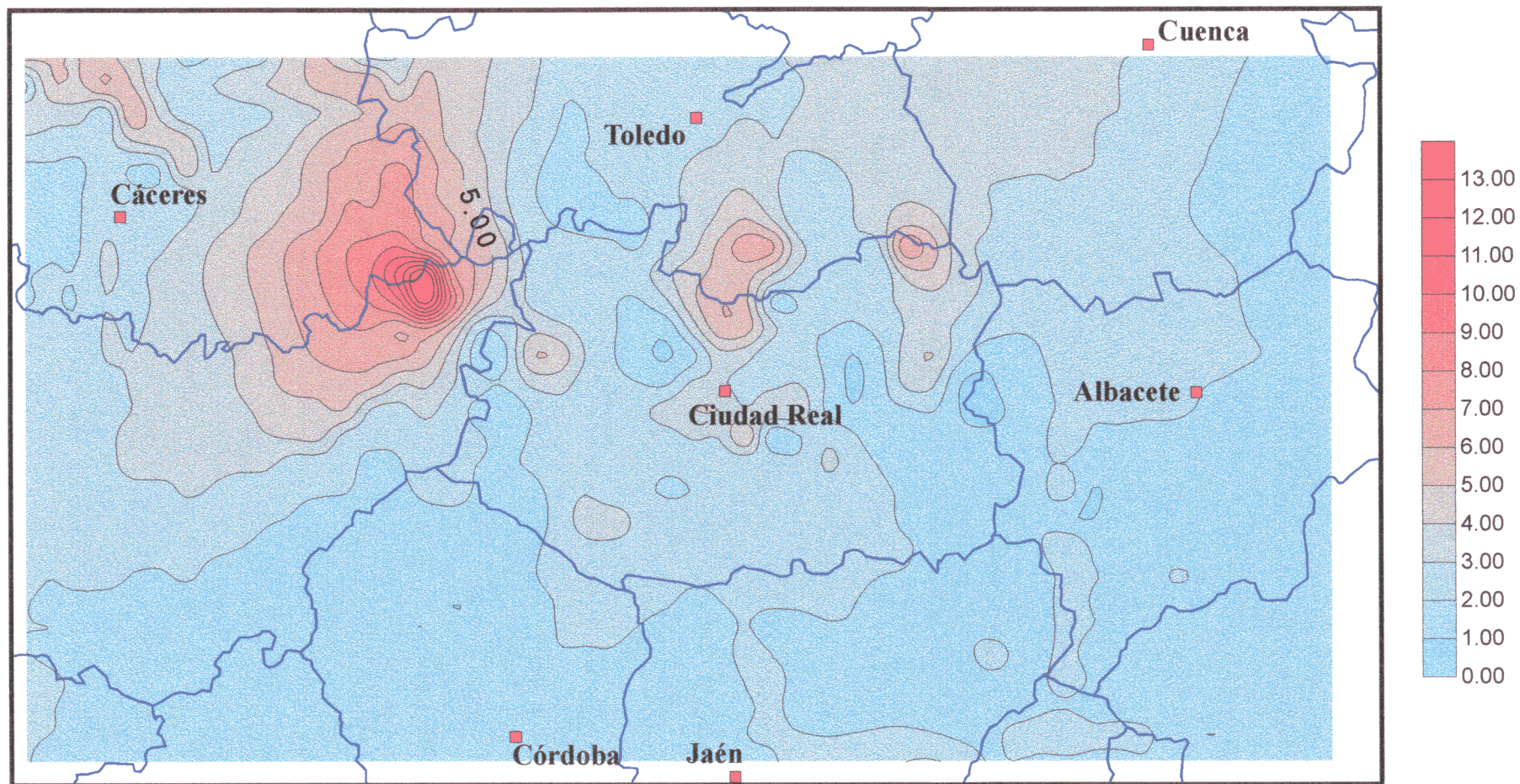
(X:660000, Y:4175100)

Figura 10.22: Mapa de isovalores interpolados de los Dominios deducidos a partir de la aplicación del programa JOINTS (Análisis Poblacional de Diaclasas). Localización de las estaciones de registro.



(X:170000, Y:4449900)

(X:660000, Y:4449900)



(X:170000, Y:4175100)

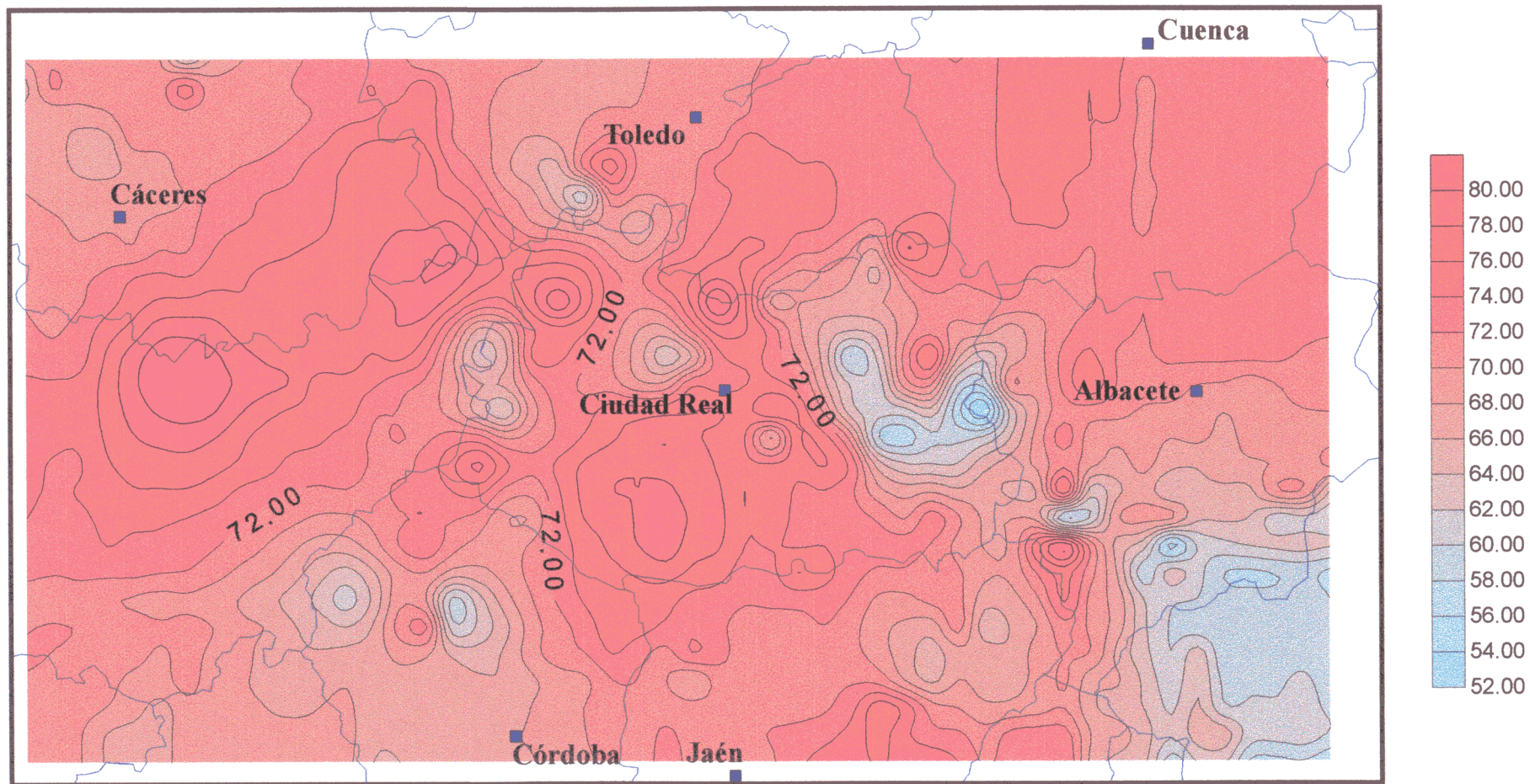
(X:660000, Y:4175100)

Figura 10.23: Mapa de isovalores interpolados de todos los valores posibles deducidos para el parámetro "K" (para su realización se han considerado las soluciones propuestas por el *Modelo de Deslizamiento* para todos los planos de falla estriados, sin distinción por modas).



(X:170000, Y:4449900)

(X:660000, Y:4449900)



(X:170000, Y:4175100)

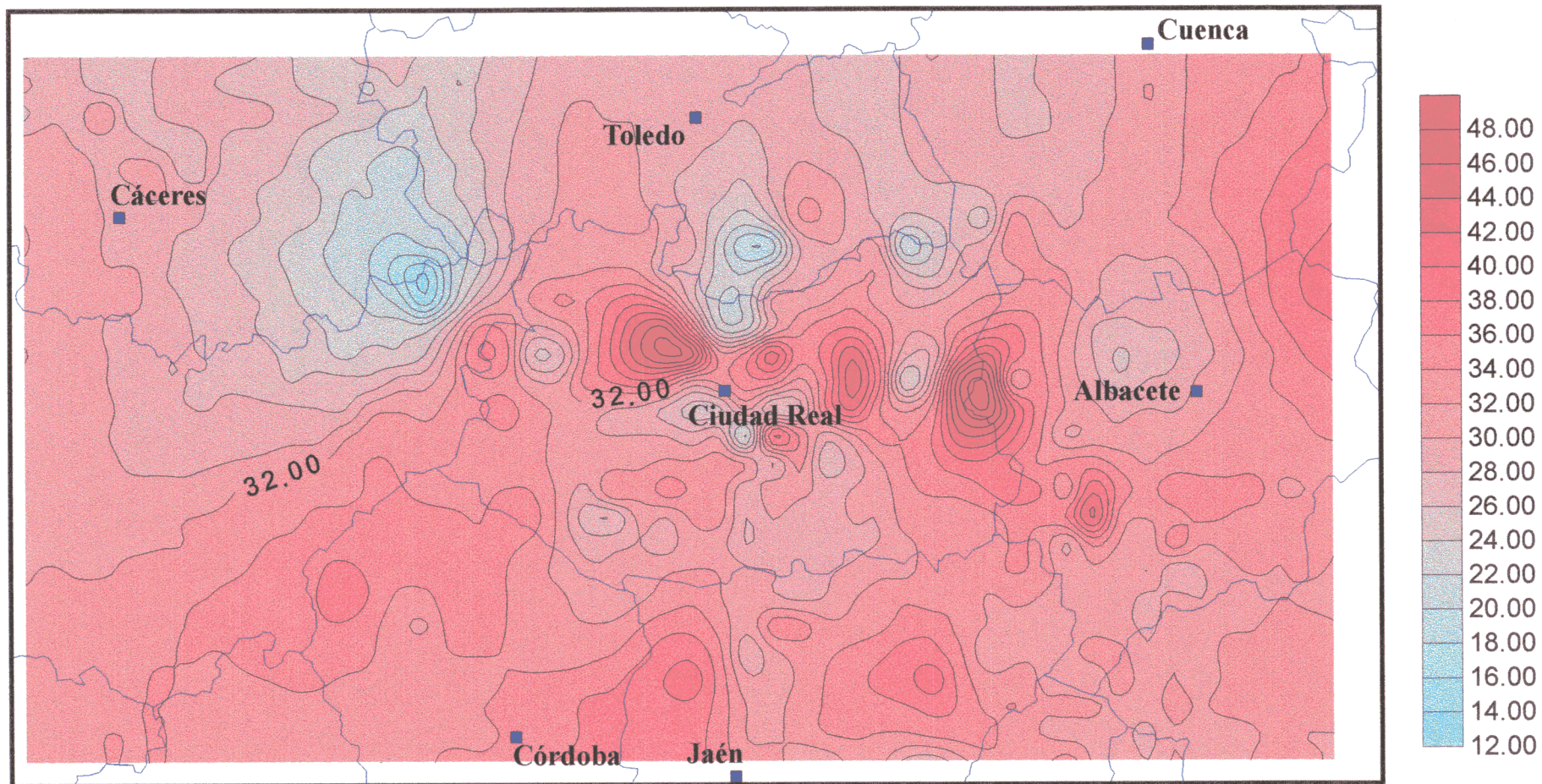
(X:660000, Y:4175100)

Figura 10.24: Mapa de isovalores interpolados del valor promedio del ángulo de buzamiento para cada una de las sub-poblaciones de fallas (sin distinción por modas).



(X:170000, Y:4449900)

(X:660000, Y:4449900)



(X:170000, Y:4175100)

(X:660000, Y:4175100)

Figura 10.25: Mapa de isovalores interpolados del valor promedio del ángulo de cabeceo para cada una de las sub-poblaciones de fallas (sin distinción por modas).



### 10.1.2. ANÁLISIS POBLACIONAL DE DIACLASAS.

El apartado previo comenzaba describiendo como el objetivo del *análisis poblacional de fallas* es caracterizar numéricamente (basándose en métodos matemáticos estadísticos que consideran fórmulas relativas al comportamiento mecánico de las rocas) la deformación frágil de una superficie, más o menos amplia, sobre la cual han incidido unos esfuerzos tectónicos. Continuaba comentando como la determinación de los paleoesfuerzos se efectúa estudiando pequeños afloramientos (estaciones de trabajo) en los cuales es visible un número adecuado de mesoestructuras. Finalmente, concluía que éste era un modo adecuado de conseguir una información suficiente, aunque puntual, de las características del elipsoide de esfuerzos.

Durante las tres últimas décadas se han ideado y desarrollado numerosas metodologías ocupadas en el análisis dinámico y mecánico de la fracturación fundamentadas en el tratamiento de una población de datos adquiridos en campo referidos a mesoestructuras frágiles, básicamente planos de falla estriados. Este desarrollo importante contrasta con la ausencia de una metodología práctica ocupada de la caracterización mecánica y dinámica del diaclasado.

Tradicionalmente se ha considerado, no sin razón, que este *análisis poblacional de fallas* era el más adecuado para tales objetivos. Tal afirmación parece ser cierta porque los planos de falla estriados proporcionan información interesante no sólo sobre la orientación (a partir de los valores de dirección del plano y buzamiento del mismo) en el espacio del plano donde ha sucedido la fractura, sino también (gracias a un tercer parámetro angular: el *cabeceo de la estria*) sobre el modo y sentido de desplazamiento de los bloques afectados por tal proceso. Así, las conclusiones potencialmente alcanzables utilizando

esta metodología serán más válidas que las obtenidas mediante el análisis de cualquier otro tipo de mesoestructura frágil. Por estas razones, y gracias a la informatización progresiva de los métodos de *análisis poblacional de fallas*, la microtectónica frágil ha avanzado espectacularmente durante todo este tiempo.

Sin embargo, no siempre es posible emplear estas metodologías, sencillamente porque no siempre existen o son visibles los planos de falla estriados; o, si afloran, no siempre la calidad de la estria aconseja su registro. Además, nuestra experiencia personal en la recopilación de datos en campo nos previene sobre el hecho de que no todas las litologías son igual de favorables para la localización de aquellos, a pesar de estar fracturadas. En resumen, no cabe duda alguna de que el *análisis poblacional de fallas* es la metodología más útil siempre y cuando sea posible emplearla.

Por otro lado, tampoco parece sensato despreciar otros elementos mesoestructurales existentes ya que, cuando menos, su estudio puede servir para contrastar resultados. Uno de estos elementos es el *diaclasado*. En la zona de estudio, su abundancia obligaba al menos a su consideración dentro de este capítulo de *Análisis Mesoestructural de la Fracturación*. Las diaclasas son el resultado más común de la deformación frágil de las rocas sobre la corteza, controlando o condicionando por ejemplo buena parte de la fisiografía, ya que son cauces preferentes para la circulación de fluidos (Pollard y Aydin, 1988). Aparecen en una amplia variedad de litologías y de entornos geodinámicos. Suele considerarse (Arlegui, 1996) que se trata de un tipo de mesoestructura poligénica, generada por procesos tectónicos *sensu strictus* o por procesos atectónicos (consolidación de rocas ígneas – véase *fotografía 10.9*), descompresiones relacionadas con

procesos erosivos, etc.). La bibliografía consultada propone diversos “soportes teóricos” capaces de explicar si no la génesis del diaclasado, sí una supuesta distribución espacial de los ejes de esfuerzo causante del mismo. Esta distribución está basada en la geometría de afloramiento de los planos de diaclasado. En esta Tesis Doctoral no se ha considerado como objetivo el intentar establecer posibles propuestas teóricas sobre el origen de las diaclasas. Sin embargo, sí se ha pretendido utilizar el análisis de este tipo de mesoestructuras frágiles como un elemento importante a la hora de proponer un entorno geodinámico para el *Antepaís Bético*. Para la elaboración de este capítulo hemos adoptado la definición del diaclasado sintetizada por Arlegui (1996) de estudios precedentes al suyo. Así, las diaclasas serían discontinuidades de las rocas producidas por la fracturación de éstas, sin que se aprecie desplazamiento relativo entre ambos bloques, y que se presentan en familias más o menos paralelas y de espaciado regular.

A partir del estudio de diaclasas en entornos geodinámicos variados (los Apalaches, el sudeste de Gran Bretaña, el noroeste de Francia, la Península Arábiga, o la Cuenca del Ebro), Hancock y Engelder (1989) proponen que:

- ⇒ Los *sistemas de joints* o de diaclasas son estructuras geológicas sencillas, las cuales consisten generalmente en un juego de fracturas extensionales verticales/subverticales o, menos comúnmente (al menos en nuestra zona de estudio), fracturas conjugadas menos verticalizadas y dispuestas paralela o simétricamente a las fracturas extensionales.
- ⇒ Muchas de estas diaclasas “cortan” uno o más niveles litológicos.
- ⇒ Los *sistemas de joints* neotectónicos han de formarse, generalmente, en los 500 metros más

superficiales de la Corteza. Es aquí donde el eje principal  $\sigma_3$  representa una orientación preferente de extensión y donde el valor (a lo largo de toda la Corteza) de la relación  $\sigma_1$ - $\sigma_3$  es menor.

- ⇒ Proponen que la génesis de las diaclasas está relacionada con la existencia de procesos de descompresión debidos a la acción de la erosión y/o a la generación de estados tensionales por flexuras o elevaciones corticales.
- ⇒ Este tipo de mesoestructuras frágiles es capaz de proporcionar información sobre el *estado tensorial* fundamentalmente en *áreas de plataforma*, ya que los *sistemas de joints* suelen disponerse paralelas o subparalelas a las orientaciones máximas y mínimas de compresión en la horizontal.

De esta manera, se nos presentó la necesidad de automatizar, sobre la base de los supuestos teóricos citados previamente y desarrollados a continuación, todo el tratamiento matemático más básico que supondría este intento de *análisis poblacional del diaclasado*, surgiendo como consecuencia de ello el programa informático *JOINTS*.

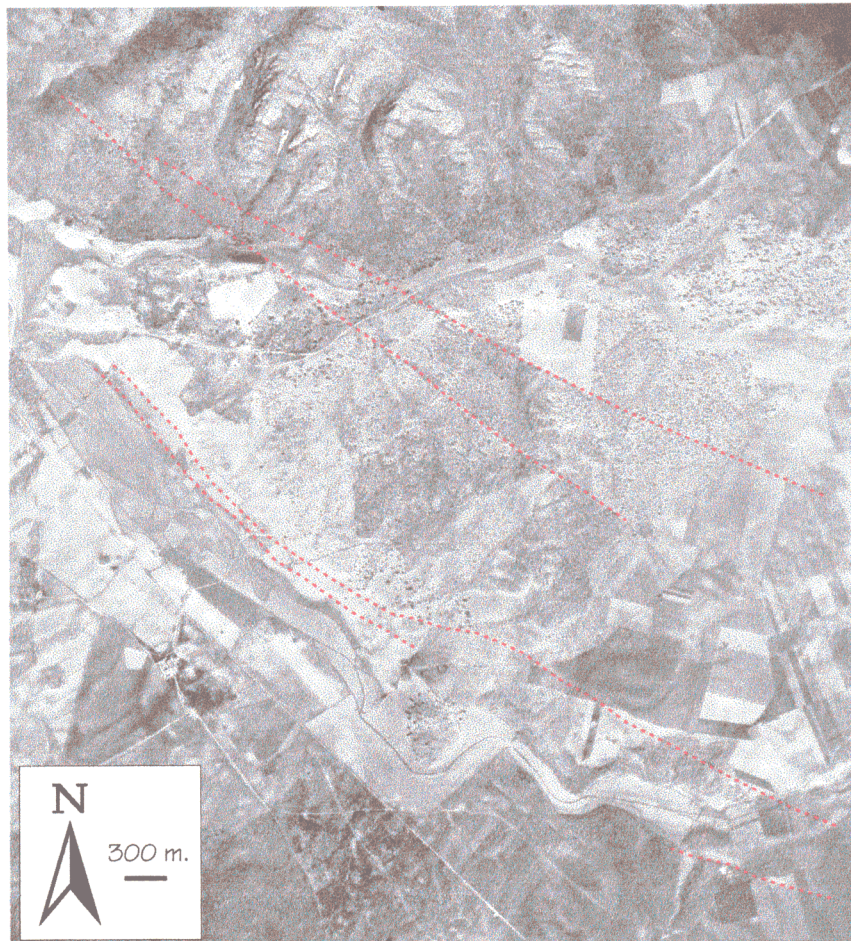
#### 10.1.2.1 Antecedentes.

Como ya se ha comentado en los apartados previos, el análisis mesoestructural de las diaclasas apenas ha sido considerado por la comunidad científica y, menos aún, para el sector del *antepaís* aquí considerado. Sí ha sido utilizado para trabajos muy específicos y localizados (Campos *et al.*, 1995), o situados fuera de nuestra zona de estudio: Simón (1984), Hancock y Engelder (1991), Arlegui (1996), Maestro *et al.* (1997) y Cortes y Maestro (1997) para la Cordillera Ibérica, la Cuenca del Ebro y la Cuenca de Almazán; y Merino *et al.*





Fotografía 10.9: Corte transversal a un frente de colada lávica (nefelinites olivínicas) en una cantera situada al sudeste de Bolaños de Calatrava. En esta fotografía puede apreciarse una disyunción columnar nítida, ejemplo de diaclasado atectónico provocado por el enfriamiento de la colada. Edificio volcánico de tipo "escudo".



Fotografía 10.10: Vista aérea de la Zona de Falla del Azuer atravesando la Antiforma de San Carlos del Valle. La competencia de la Formación Cuarcita Armoricana permite comprobar como parte de las fracturas funcionan de un modo alternativo bien como fallas o bien como diaclasas. Se han destacado algunas de las trazas que conformarían esta zona de fracturación preferente (sísmicamente activa en la actualidad).



(1996) para la Cuenca de Miranda-Treviño (Cuenca Vasco-Cantábrica).

#### 10.1.2.2 Fundamentos teóricos del programa de análisis poblacional de diaclasas: "JOINTS"

El interés fundamental del análisis de este tipo de mesoestructura frágil radica, más que en el conocimiento de su origen, en el establecimiento de un patrón espacial de su afloramiento. La *fotografía 10.10* ilustran como las diaclasas (al igual que sucede con las fallas) definen patrones de afloramientos consecuentes entre sí a distintas escalas de trabajo, lo cual otorga (en nuestra opinión) una mayor validez a las posibles conclusiones tensoriales que se deduzcan a partir de la ejecución de un análisis estructural de tales patrones de afloramiento a escala mesoscópica. El programa *JOINTS* pretende facilitar el análisis estadístico y mecánico automático de los planos de diaclasado: análisis poblacional de diaclasas.

Proporciona una estadística descriptiva de los datos obtenidos *in situ* en distintas estaciones de trabajo, además de una presentación ordenada de los resultados. Esta descripción se completa con la representación gráfica de los planos mediante proyección estereográfica (Wulff o Schmidt, hemisferio inferior), así como mediante diagramas de densidades, histogramas de frecuencia y rosas direccionales de frecuencia. Por último, el programa proporciona soluciones numéricas y gráficas de los tensores de esfuerzo teóricos capaces de explicar la generación mecánica de las diaclasas analizadas en cada población, así como diversas posibilidades de exportación de los ficheros a otros programas informáticos usados tradicionalmente para el análisis estructural geológico.

Tal y como sucede con cualquier otra metodología destinada al análisis de la fracturación

en Geología, las conclusiones que proporcione el programa *JOINTS* para un conjunto de poblaciones de datos debieran ser contrastadas y complementadas con las obtenidas mediante la aplicación de otras técnicas de análisis mesoestructural en esa misma región (por ejemplo, el uso de técnicas relacionadas con el análisis poblacional de fallas). Igualmente se considera muy interesante la contrastación de los resultados obtenidos por *JOINTS* con el análisis de la disposición espacial preferente de los principales rasgos geomorfológicos del sector considerado (relieve, red fluvial, macrolineaciones, etc.). Al igual que Arlegui (1996), para la elaboración del programa y su aplicación en este trabajo hemos considerado al denominable como *muestreo ciego* el sistema más idóneo para adquirir los datos mesoestructurales de partida. Éste consistiría en la elección de un afloramiento de buena calidad y en la medición sobre él de tantas fracturas existentes como consideremos necesarias<sup>11</sup>, primando siempre durante el proceso de la adquisición un criterio de objetividad total.

*JOINTS* analiza matemáticamente un único tipo de fracturas geológicas: las diaclasas; bajo los supuestos teóricos de Hancock y Engelder (1989) y de Scheidegger (1980). Considera, además, parte del desarrollo teórico y matemático propuesto por De Vicente (1988) para el análisis poblacional de fallas cuando la disposición espacial del diaclasado cumple ciertos requisitos.

Hancock y Engelder (1989) relacionaron el diaclasado observable en varias zonas por ellos estudiadas con flexuras de la Litosfera. Citan la existencia de una orientación preferente para las joints o diaclasas. Las redes o sistemas de juntas y diaclasas atestiguarían una relación entre su desarrollo y la actuación de esfuerzos: relajación



frágil de una deformación elástica. La orientación preferente de las joints debe estar en armonía con la dirección de esfuerzos máxima en la horizontal, pero no necesariamente ser paralela a ésta. Sugieren un intervalo de confianza de unos  $\pm 20^\circ$ . Para ellos la geometría de esta "familia de diaclasas" se caracteriza por su simplicidad, atraviesen o no materiales con fracturas previas. Por lo general, estas joints (*sistemáticas*) son bastante paralelas entre sí ( $\pm 10^\circ$  con respecto a la orientación media del "set"). Según donde se sitúe el eje principal de esfuerzos  $\sigma_1$  y según sea su intensidad (y la del resto de los ejes) predominarán las discontinuidades tensionales *sensu strictus*, o de *tipo I*, (un único plano) o las discontinuidades tensionales conjugadas (dos planos de igual orientación pero con buzamientos enfrentados), o ambas. En una "joint conjugada" un plano será más antiguo que el otro.

Aunque estos planos se formen de manera simultánea, cada discontinuidad refleja un evento extensional propio dentro de una fase estructural sencilla. Ortogonales a estas diaclasas preferenciales se dispondrían joints *no sistemáticas* (véanse fotografías 10.11 y 10.12). Estos autores sugieren que el eje principal  $\sigma_1$  debe ser paralelo o subparalelo a tal orientación preferente, y que el eje principal  $\sigma_3$  debería situarse de un modo ortogonal con respecto a tal orientación y, por tanto, también en la horizontal.

Otro de los modelos aplicables al origen del diaclasado es el propuesto por Scheidegger (1980). Según éste, en un afloramiento sencillo encontramos tres sistemas o familias de joints: uno es horizontal o subhorizontal (buzamientos variables entre  $0^\circ$ - $40^\circ$ ) y se relaciona con factores litológicos; los otros dos sistemas son prácticamente verticales y forman

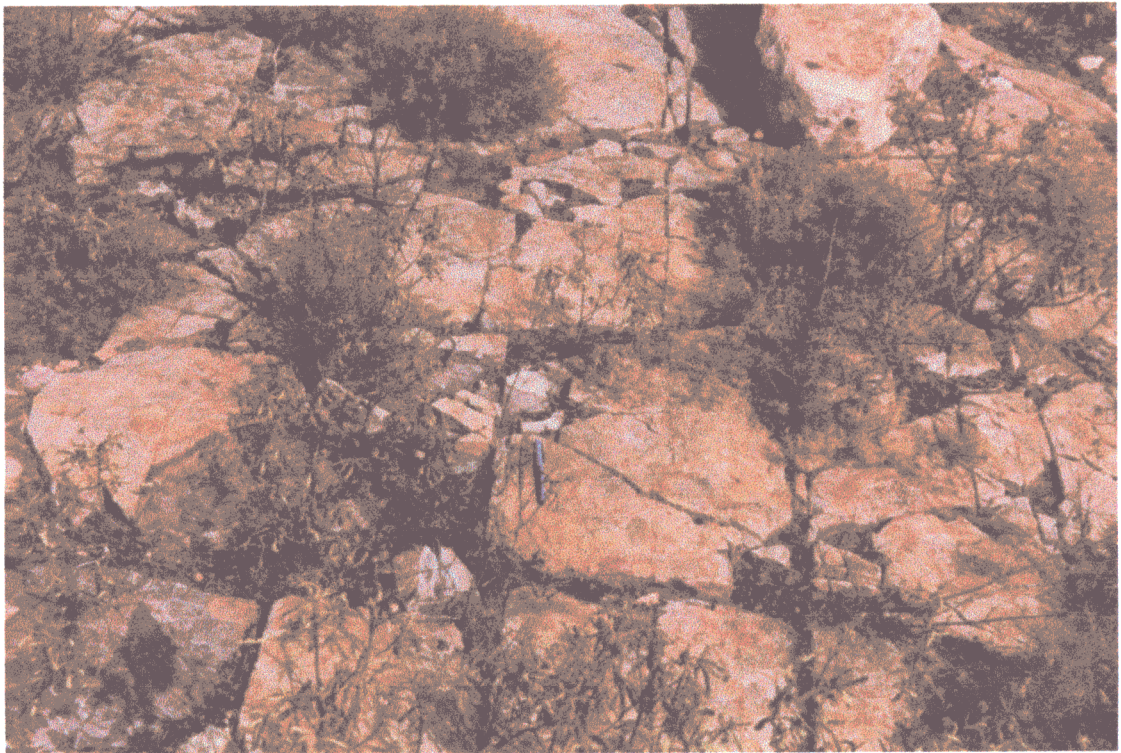
ángulos entre sí en la horizontal elevados. Las joints serían líneas de cizalla en un campo de esfuerzos tectónico, o discontinuidades de *tipo II*. En general, las orientaciones de estas familias verticales suelen ser bastante constantes. Para él, estas diaclasas se orientan como superficies que bisectan espacialmente a  $\sigma_1$  y a  $\sigma_3$ , conteniendo tales superficies a  $\sigma_2$ , o dicho de otra forma, los ejes  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  son las bisectrices de los ángulos formados por las "familias verticales" ( $\sigma_1$  del ángulo agudo y  $\sigma_3$  del ángulo obtuso), con lo cual queda claro su origen relacionado con fenómenos de cizalla (véase fotografía 10.13). Scheidegger (1980) piensa, al igual Hancock y Engelder (1989), que el diaclasado debe tener un origen reciente. Sin embargo, mientras que para el primero existen tres orientaciones preferentes de diaclasado (una subhorizontal y dos verticales y casi ortogonales entre sí), para los segundos existe una orientación preferente y característica (paralela o subparalela al máximo esfuerzo compresivo horizontal), y otras dos posibles subparalelas a la primera de orientaciones similares pero de buzamientos enfrentados (además ellos citan la existencia de las joints *no sistemáticas* ortogonales a las preferentes).

Todo el tratamiento matemático referido al cálculo tensorial en el programa JOINTS parte de una premisa impuesta por el programa: la subdivisión de los datos potencialmente registrables en campo en tres *Dominios de trabajo*. Así, utilizando los supuestos de Scheidegger (1980) y de Hancock y Engelder (1989) proponemos una hipótesis para la determinación del estado de esfuerzos (disposición espacial de los tres ejes principales de esfuerzo) basada en el análisis estadístico de los planos de diaclasado. Ésta se puede resumir en los siguientes puntos:

<sup>11</sup> En nuestro caso, y una vez aplicado el programa, (véase página siguiente)

sugerimos un valor mínimo de cincuenta planos.



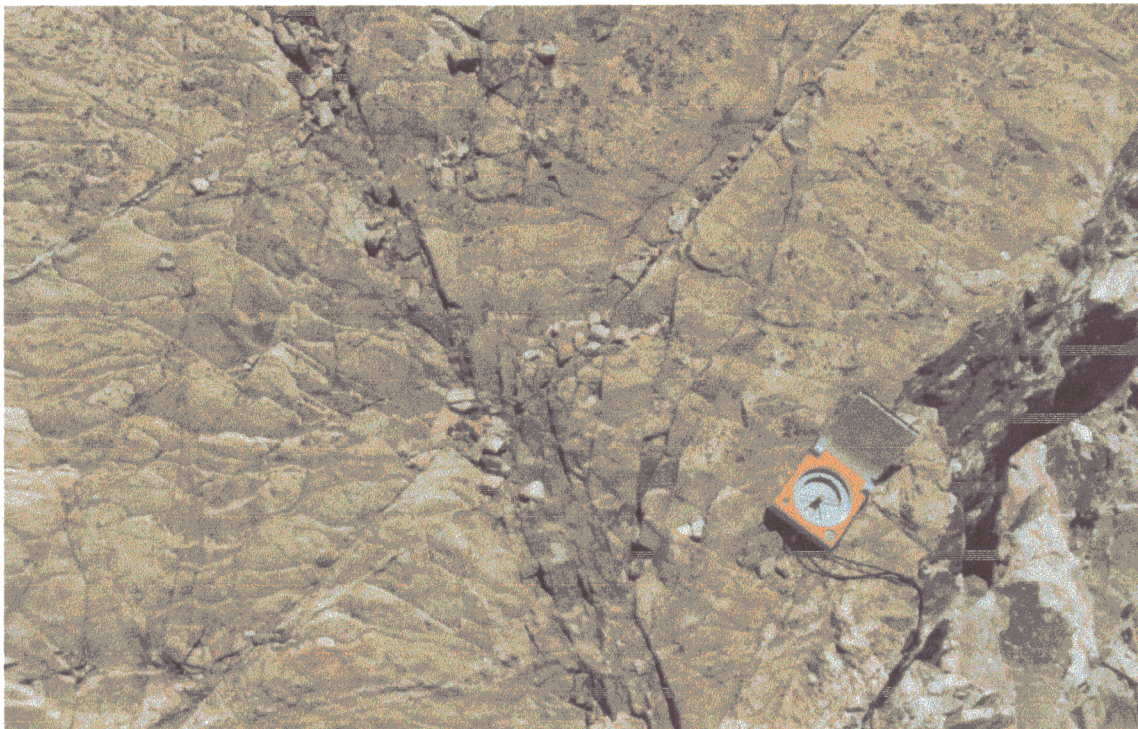


Fotografía 10.11: Ejemplo real de *joints sistemáticas* (orientadas paralelas al bolígrafo, según NO-SE) y de *joints no sistemáticas* (ortogonales a las anteriores) afectando ambas a los niveles cuarcíticos del techo de las "Series Púrpuras" (Tremadociense-Arenigiense). Nótese el menor espaciado en la distribución de las primeras con respecto a las segundas (diaclasado situado en la charnela de un pliegue con su eje, horizontal, dispuesto hacia N60°E).

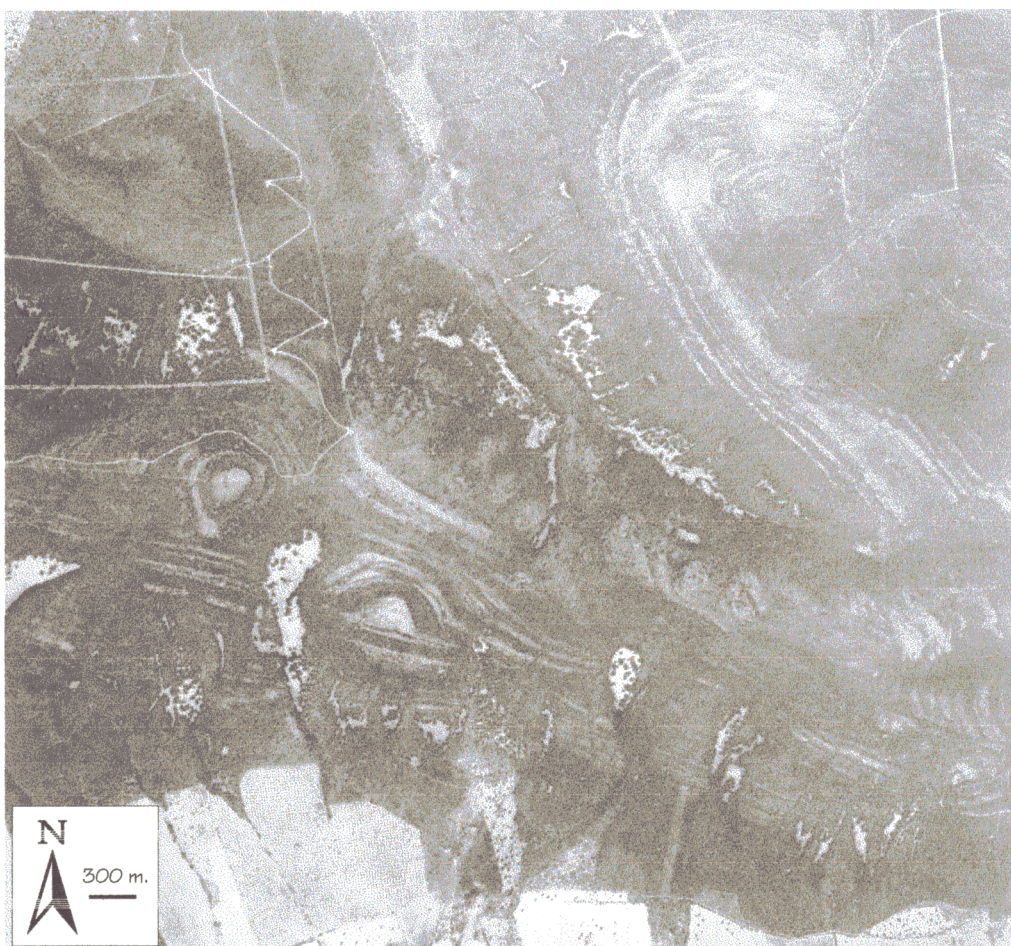


Fotografía 10.12: Afloramiento mayoritario de *joints sistemáticas* (orientadas según NO-SE, ortogonales al plano del papel) y de *joints no sistemáticas* (ortogonales a las anteriores), afectando ambas a la Formación Cuarcita Armoricana (buzamiento subvertical hacia el sur).





Fotografía 10.13: Ejemplo de diaclasado de *tipo II* afectando a materiales paleozoicos en las proximidades a Alcázar de San Juan.



Fotografía 10.14: Vista aérea del flanco norte del Sinclinal de Los Yébenes (al oeste de esta localidad). En el interior de la estructura existen otras menores sumamente complejas, tales como estructuras dómicas, sinclinales, anticlinales, fallas y diaclasas, afectando todas ellas a las Series Púrpuras y a la Formación Cuarcita Armoricana.



1. Obtención de las frecuencias relativas correspondientes a los "z" intervalos (por defecto son 18 intervalos de 10° cada uno) de orientación propuestos para la población a analizar.

2. Obtención de la 1ª moda y de la 2ª moda de la población a analizar. Puede suceder que existan dos máximas primeras modas (dos valores de "D", dirección del plano de diaclasado, cuyas frecuencias relativas son similares). En este caso el programa calcula las respectivas desviaciones típicas correspondientes a las dos poblaciones extraíbles al considerar un intervalo de  $\pm 20^\circ$  de ambas modas máximas (esto es, todos los datos "D" correspondientes a los dos intervalos superiores e inferiores a los que definen las dos modas máximas, éstas inclusive). Una vez hecho esto, se elige como 1ª moda a la que haya mostrado menor valor de desviación típica, y será la 2ª moda aquella que haya mostrado mayor valor de desviación típica. En el caso de que coincidieran dos máximas segundas modas se procederá del mismo modo que el descrito anteriormente, eligiéndose como 2ª moda a aquella que posea la menor desviación típica. En el caso de que hubiera tres o más coincidencias se procedería del mismo modo.

3. Cálculo del parámetro angular " $\alpha$ " (medido en ° centesimales). Este ángulo se corresponderá con el valor angular más bajo (ángulo agudo) definible entre el intervalo espacial que representa la 1ª moda y el intervalo espacial que representa la 2ª moda. Para su cálculo se utiliza el parámetro auxiliar " $\alpha'$ ", el cual equivale al producto del intervalo espacial que representa la 1ª moda por el intervalo espacial que representa la 2ª moda.

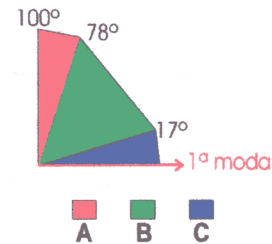
Sí  $\alpha' > 100^\circ$ ; entonces

$$\alpha = 200^\circ - \alpha'$$

Sí  $\alpha' < \text{ó} = 100^\circ$ ; entonces

$$\alpha = \alpha'$$

Dependiendo del valor del parámetro angular " $\alpha$ " (oscilante entre  $0^\circ$  y  $100^\circ$  centesimales) se definen tres *Dominios de Trabajo* o *Aplicación* diferentes, tal y como se esquematiza en el gráfico siguiente:



Dominios de trabajo en función del ángulo  $\alpha$  (° centesimales)

El programa proporciona un método de comprobación de los resultados tensoriales (aplicable preferentemente para aquellas poblaciones enmarcadas por *JOINTS* dentro del *Dominio B*) basado en el *Diagrama e/K'* de De Vicente (1988). Este diagrama permite visualizar un gráfico en el cual se contrastan el parámetro angular " $E_y$ " (orientación de la máxima compresión en la horizontal) y el parámetro adimensional  $K'$  (obtenido a partir del Sentido de Inmersión e Inmersión de los planos de diaclasado). Igualmente, es posible utilizar este Diagrama, mediante la correspondiente ventana interactiva, para obtener conclusiones tensoriales finales una vez comparadas las proporcionadas por esta metodología y las proporcionadas por el programa. Por tanto, el Diagrama *permite una estimación tensorial directa fundamentada en la geometría y orientación de los planos de diaclasado*. Esta estimación contrasta con la proporcionada por el programa *JOINTS* basada sólo en parámetros estadísticos. Igualmente, y a partir del valor de  $K'$ , es posible calificar la fracturación dentro del campo Normal, Normal-Direccional, o Direccional-Normal. Por último, este Diagrama nos proporciona información interesante sobre las subpoblaciones diferentes incluidas potencialmente dentro de la población total (posibles familias de curvas con

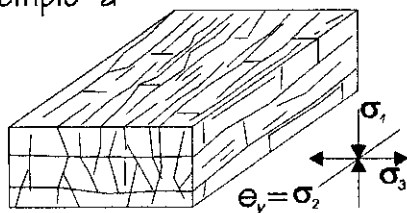


aperturas de curvas similares) susceptibles de ser tratadas con posterioridad mediante un apartado de *JOINTS* que permite separar subpoblaciones de una original.

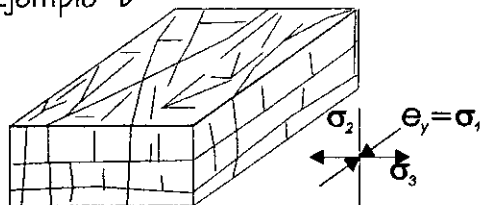
El significado estructural de los *Dominios de trabajo* es una consecuencia directa del supuesto teórico que se considere para explicar la población de diaclasas, el cual depende del parámetro angular " $\alpha$ " y, por tanto, de las dos primeras modas estadísticas definibles para la población.

⇒ Para el *Dominio A*, se estima por defecto una propuesta tensorial de tipo extensional pura y diaclasas preferentemente de *tipo I* (predominio de diaclasas según el ejemplo *a*; modificado de Hancock y Engelder, 1989).

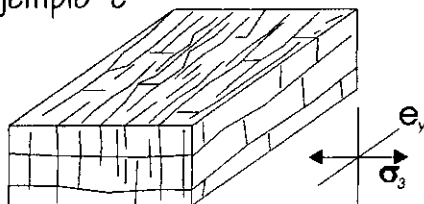
Ejemplo "a"



Ejemplo "b"



Ejemplo "c"



⇒ En el *Dominio B*, sin embargo, predominarían las diaclasas de *tipo II* y un tensor de esfuerzos compresivo, dentro de la extensión preferente

que supone la génesis del diaclasado (predominio de diaclasas según el ejemplo *b*).

⇒ Por último, para el *Dominio C* se considera un tensor de esfuerzos preferentemente compresivo débil o débilmente Extensional (predominio de diaclasas según el ejemplo *c*).

### 10.1.2.3 Metodología de trabajo.

Tal y como se expuso para el *análisis poblacional de fallas*, el volumen de datos que suponía el desarrollo del *análisis poblacional de diaclasas* obligó a seguir un esquema organizativo muy concreto, aunque menos complejo que el definido para los planos de falla estriados. En la *figura 10.26* se muestra un esquema de esta estructuración.

De nuevo, y por lo que se refiere al Antepaís Bético, a partir de una recopilación de la bibliografía existente sobre el *análisis poblacional de mesoestructuras frágiles* y de las *síntesis cartográficas geológicas* (a escalas 1:200.000 y 1:50.000) se realizó una selección de áreas de interés. Como se muestra a continuación, los criterios que contemplaba esta selección son idénticos a los definidos para el caso de las fallas. Así, esta selección contempló como criterios básicos:

1. Una edad preferente Mioceno superior-Actualidad de los materiales a analizar. Se consideró como premisa inicial, a partir de consultas bibliográficas, que este espacio temporal suponía el periodo de incidencia neotectónica.

2. La localización de las posibles estaciones de trabajo tanto en las proximidades a accidentes estructurales cartografiados previamente por otros autores en las síntesis bibliográficas consultadas como en sus proximidades. De este modo era posible contrastar la existencia de probables

## ANÁLISIS POBLACIONAL DE DIACLASAS

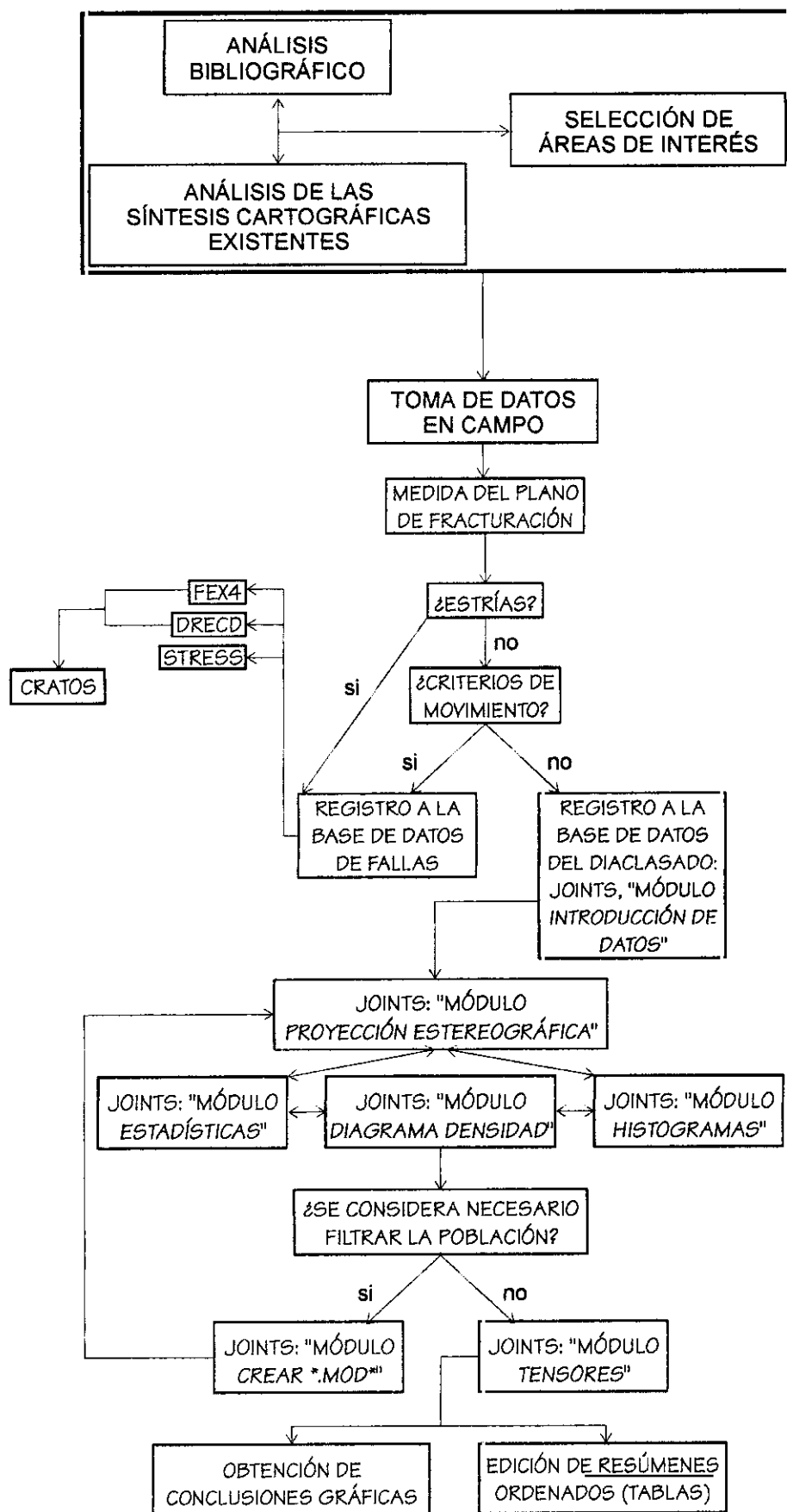


Figura 10.26: Esquema general de la metodología de trabajo seguida para la consecución de este Apartado.



refracciones o acomodaciones del posible tensor de esfuerzos regional al incidir sobre los accidentes.

3. Dado que en una amplia extensión de la zona de estudio afloran materiales previos al Mioceno superior (basamento hercínico y cobertera mesozoica) y que, además, los afloramientos de materiales asignables al periodo neotectónico son en la mayor parte de los casos poco favorables para la medida de la orientación de los planos de fracturación<sup>12</sup>, se optó entonces por tomar también registros en el resto de litologías aflorantes (preferentemente, de nuevo, en las proximidades a accidentes estructurales cartografiados en la bibliografía).

4. De las litologías aflorantes en los puntos seleccionados de este modo, se han escogido (siempre que ha sido posible) sólo los tramos que mostrarán mayor competencia a la fracturación. Así, por ejemplo, se han obtenido registros en conglomerados cuaternarios fuertemente cementados pero no en niveles margo-arcillosos triásicos o miocenos, o en niveles arenosos miocenos y cuaternarios.

Por lo que se refiere a la toma de datos en las otras “provincias volcánicas”, cabe decir que sólo se han obtenido registros en la Isla de Fuerteventura. La localización de las estaciones de medida estuvo, de nuevo, supeditada (aunque de un modo flexible) al marco de una campaña geológica que contemplaba otros aspectos geológicos como preferentes además del puramente estructural.

De la misma manera, se intentaron seguir criterios de selección similares a los anteriores, buscando ante todo la posibilidad de registrar en materiales de edades recientes pero diferentes. Así, de nuevo, sería posible discriminar la existencia o

inexistencia de variaciones del estado de esfuerzos incidente.

El programa *JOINTS* nos proporciona conclusiones numéricas y gráficas sobre la base de la aplicación de parámetros estadísticos. Bajo ciertas condiciones considera también parámetros mecánicos de rotura de un volumen rocoso proporcionando conclusiones que, finalmente, habrán de sufrir las restricciones estadísticas. Por este motivo, cuanto mayor sea el número de registros conseguido (siempre dentro de unos límites lógicos de espacio y tiempo) mayor será la representatividad de los resultados potencialmente deducibles.

El uso de *JOINTS* queda reducido a una toma de sucesivas decisiones por parte del usuario sobre la población de planos de diaclasado introducida: posible discriminación de *poblaciones polifásicas* para generar *poblaciones monofásicas*, posible modificación de los valores angulares que permiten la orientación del plano en el espacio, posibles elecciones de propuestas tensionales diferentes, posible suma de poblaciones similares, etc. Para ayudar al usuario en estos pasos sucesivos el programa proporciona herramientas de análisis parciales: histogramas de frecuencia, representaciones de las trazas ciclográficas de los planos, parámetros estadísticos descriptivos, diagramas de densidad, herramientas de filtrado de datos, etc. El resultado final ofrecido por este programa es una propuesta tensorial tanto numérica (editable posteriormente mediante las tablas correspondientes) como gráfica (véase *Anexo I*).

#### 10.1.2.4 Ubicación de las estaciones de trabajo. Cálculo de tensores de esfuerzo y elaboración de mapas de trayectorias: Conclusiones.

Para este trabajo se han considerado 57 estaciones distribuidas a lo largo del *Antepaís*

<sup>12</sup> Debido a la escasa calidad de los cortes.

Bético (3254 planos de diaclasado). En la *figura 10.27* se muestra su distribución espacial y la edad de los materiales sobre los cuales se realizaron los registros. Mediante el programa *JOINTS* se han obtenido distintas propuestas tensoriales para cada población de datos, las cuales se han sintetizado en las tablas del *Anexo I*. Las diaclasas muestran conclusiones tensoriales similares a las descritas en el apartado anterior referido a las *fallas*. Así, el diaclasado ha proporcionado dos propuestas tensoriales orientadas de manera semejante pero con permutaciones coaxiales en la disposición espacial de los ejes horizontales de esfuerzo máximo ( $E_y$ ) y mínimo ( $E_x$ ). Por este motivo, se han “filtrado” las conclusiones tensoriales, asignando a aquellas con un eje de esfuerzo horizontal orientado entre  $N90^\circ$ - $180^\circ E$  la denominación de “MODA 1”; al resto se les ha englobado bajo el calificativo de “MODA 2”. De este modo, se han construido *mapas de trayectorias* a partir de la orientación de los ejes de esfuerzo horizontales máximo y mínimo para ambos casos:  $E_y$ -MODA1 (*figura 10.28*),  $E_x$ -MODA1 (*figura 10.29*),  $E_y$ -MODA2 (*figura 10.30*),  $E_x$ -MODA2 (*figura 10.31*), superposición de  $E_y$ -MODA1 y de  $E_y$ -MODA2 (*figura 10.32*), y superposición de  $E_x$ -MODA1 y de  $E_x$ -MODA2 (*figura 10.33*). A continuación se realiza una descripción de las conclusiones mediante esta subdivisión por modas.

#### MODA 1.

Más del 60% de las estaciones de registro han proporcionado una propuesta tensorial asignable a esta MODA 1. A partir del programa *TRAJECT* (Lee y Angelier, 1994) se ha obtenido una orientación promedio del valor de “ $E_y$ ” para este *tensor de esfuerzos preferente o regional* según  $N141^\circ E$ . En el mapa de trayectorias correspondiente

al esfuerzo horizontal máximo (*figura 10.28*) puede observarse una orientación casi constante de las mismas para el sector meridional, y un cambio de sentido brusco preferente sucedido en el interior de las provincias de Ciudad Real y Albacete. Los datos individuales para cada estación revelan que esta refracción sucede tanto en sentido levógiro (hacia ESE-ONO o NO-SE) como dextrógiro (hacia N-S).

En el sector meridional, las variaciones son más suavizadas que en la *zona de refracción*. Sin embargo, parece intuirse una tendencia preferente hacia NO-SE tanto en la provincia de Córdoba como al este de Jaén y al sur de Albacete; mientras que al sur de Ciudad Real y al norte de Jaén las trayectorias tienden a disponerse  $\sim N140^\circ$ - $160^\circ E$ .

#### MODA 2.

El 40% del total de los registros se acomoda a un tensor de esfuerzos caracterizado por una compresión máxima horizontal media orientada según  $N33^\circ E$ . Este porcentaje menor si se le compara con la MODA 1 supone, por el contrario, un grado de representatividad más amplio para el área analizada (*figura 10.30*). En la zona donde las trayectorias que definen ambas modas son superponibles (*figura 10.32*) se comprueba como las trayectorias se intersectan formando ángulos oscilantes entre  $40^\circ$  y  $60^\circ$ , a excepción de la mencionada *zona de refracción* donde las trayectorias que definen ambas modas tienden a ser ortogonales entre sí. Fuera de esta zona de solape, las trayectorias de la MODA 2 definen curvas relativamente complejas y variables. En este sentido, la tendencia  $N33^\circ E$  parece distorsionarse en la prolongación teórica de aquella *zona de refracción*. Esta refracción no parece progresar más al oeste de la localidad de Medellín, a partir de la cual las trayectorias tienden a disponerse de un



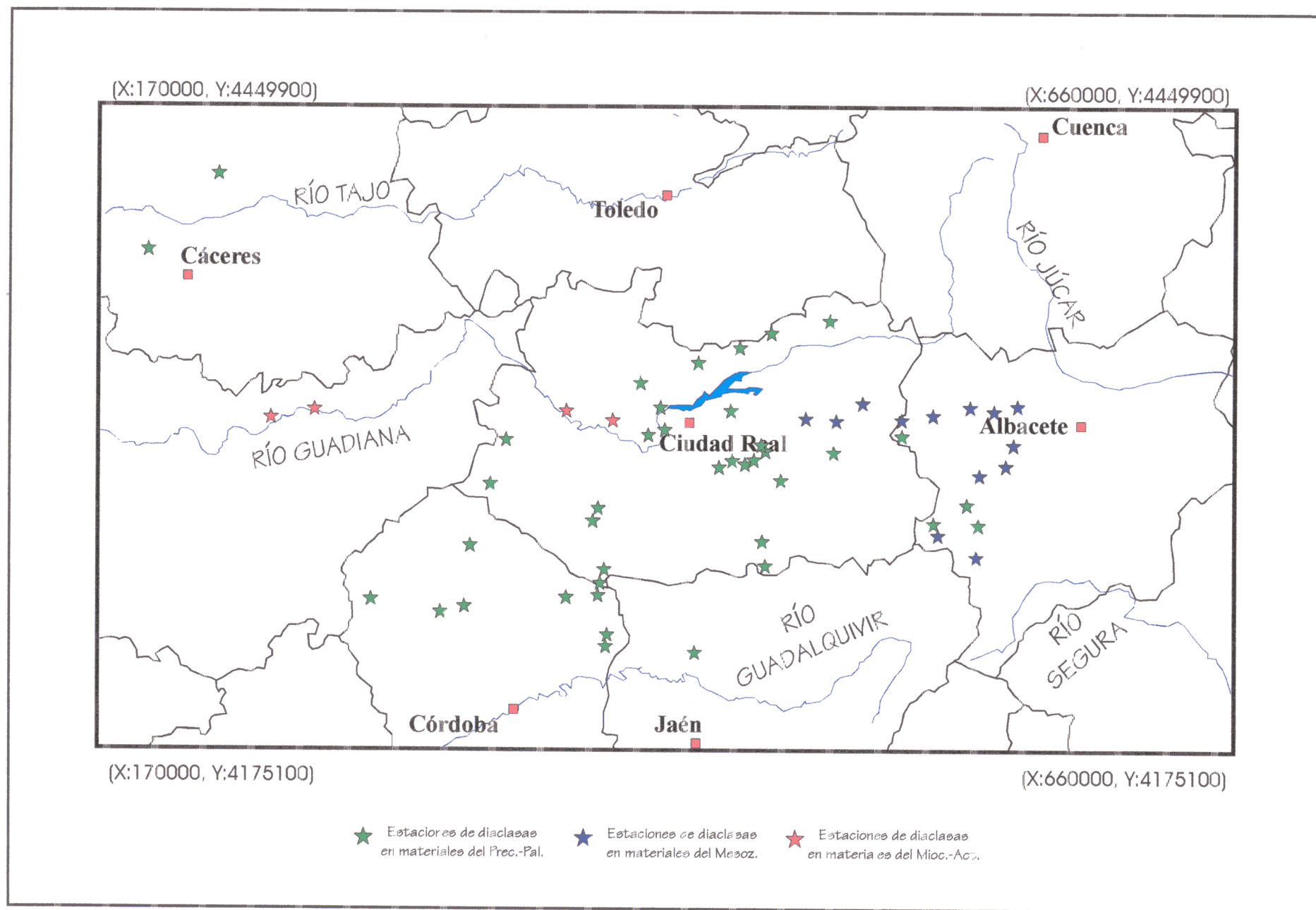


Figura 10.27: Localización de las estaciones de registro de planos de diclasados.

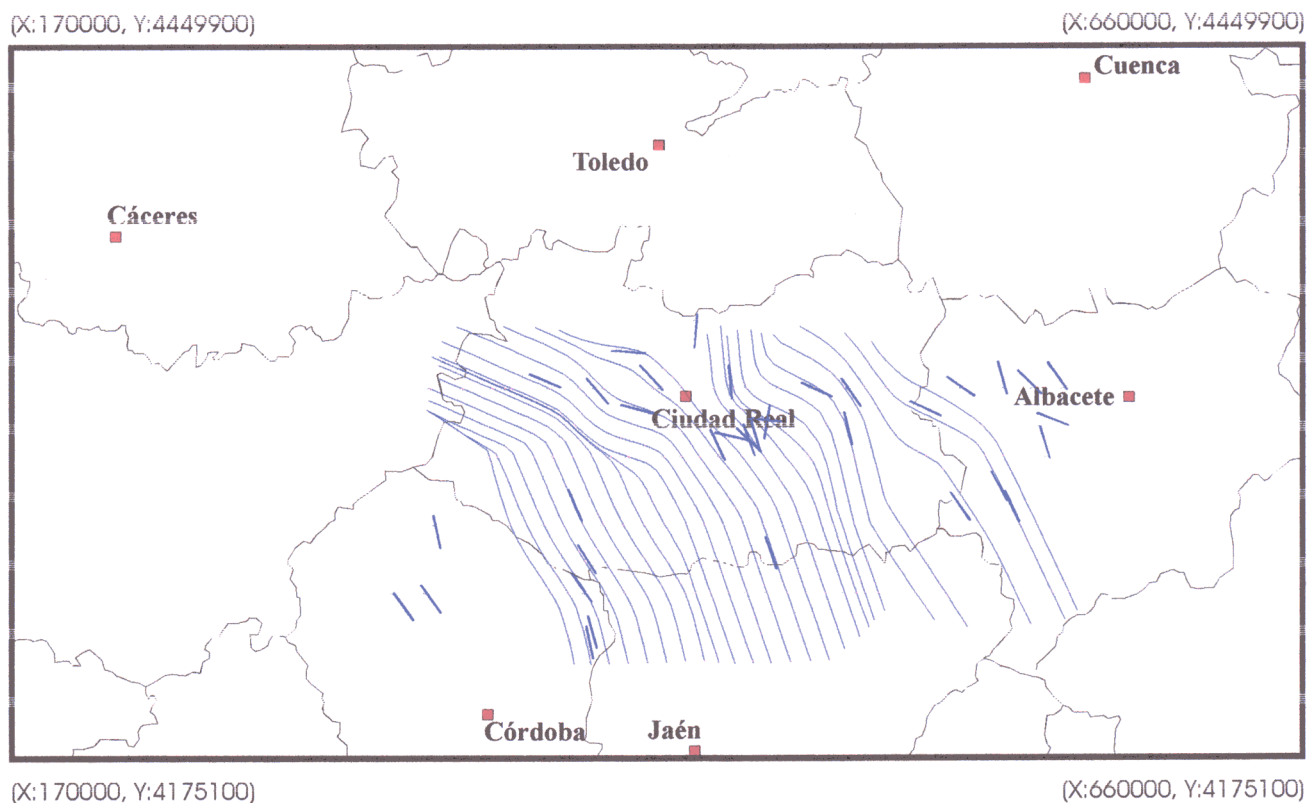


Figura 10.28: Mapa de trayectorias para el parámetro " $E_y$ " a partir de la "Moda 1".

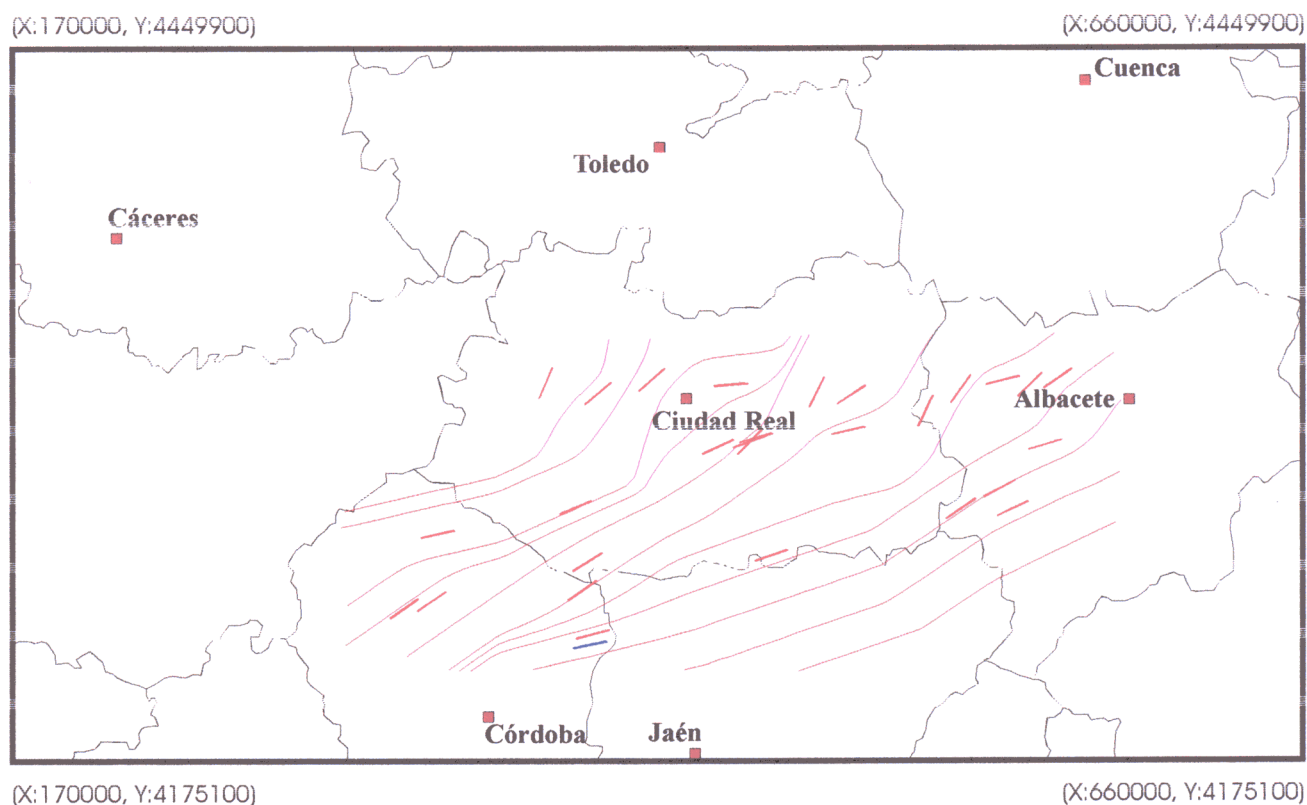
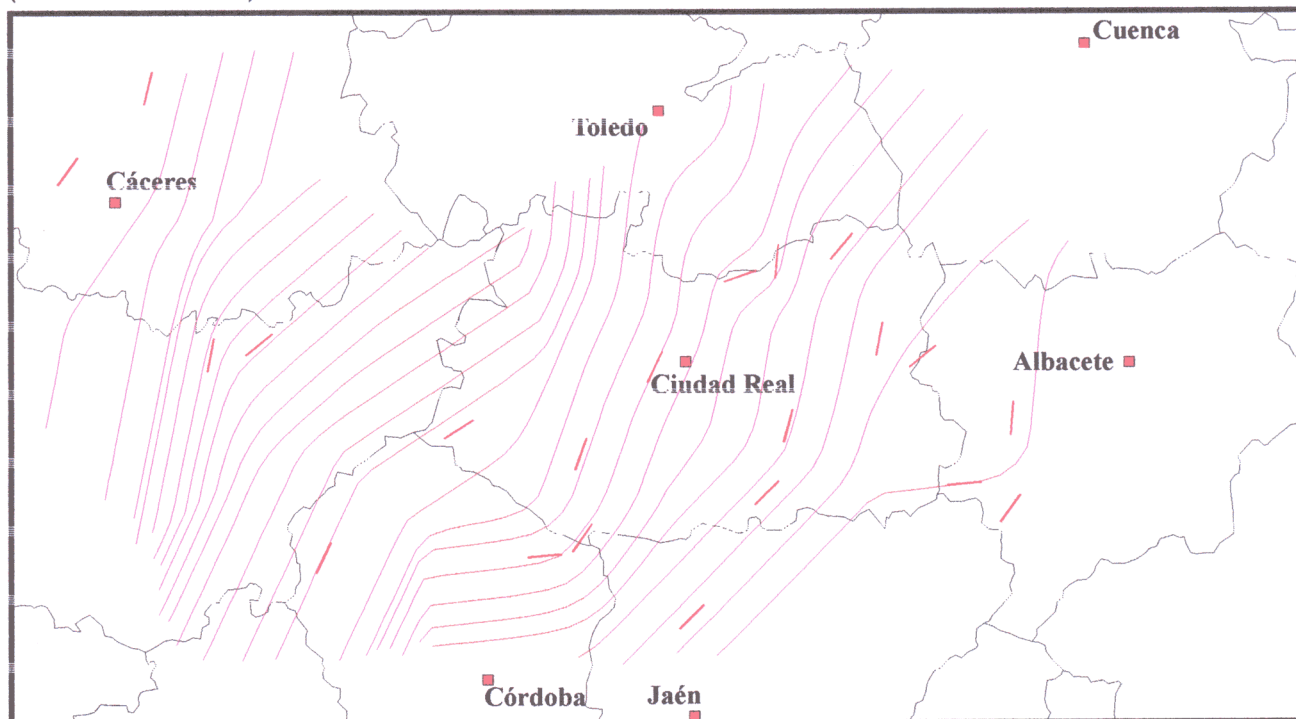


Figura 10.29: Mapa de trayectorias para el parámetro " $E_x$ " a partir de la "Moda 1".



(X:170000, Y:4449900)

(X:660000, Y:4449900)



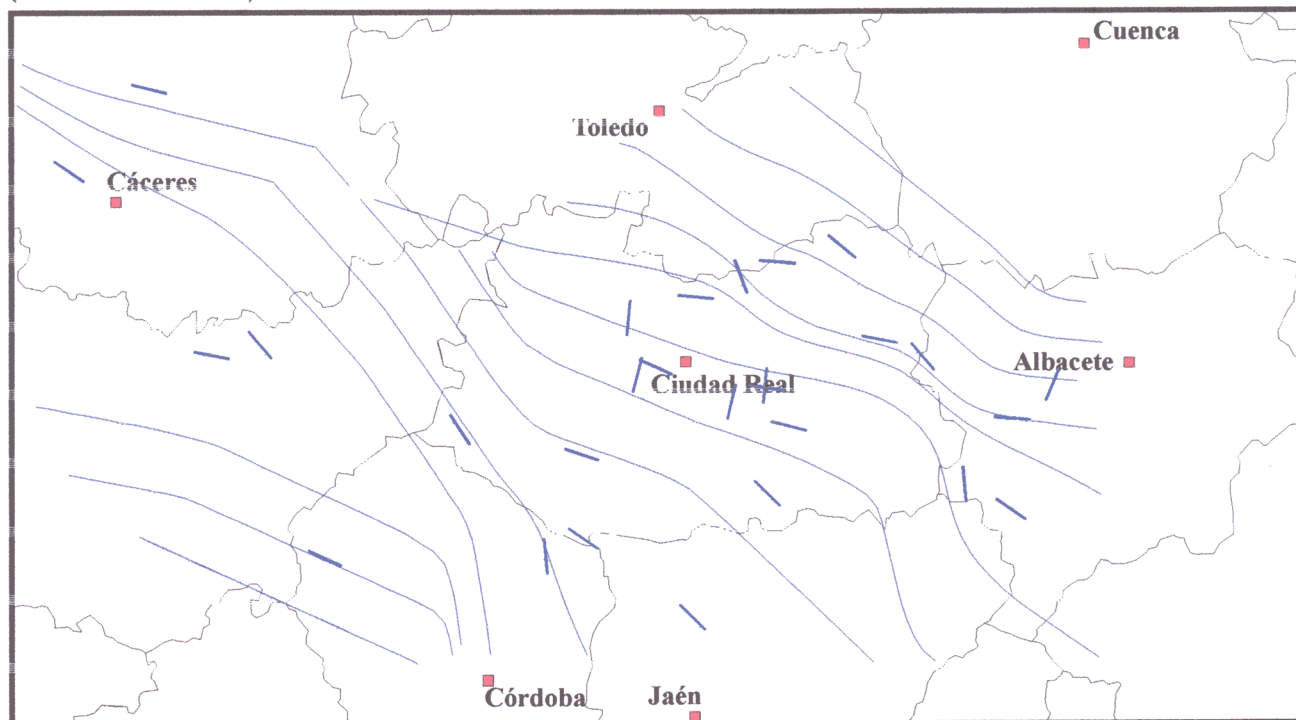
(X:170000, Y:4175100)

(X:660000, Y:4175100)

Figura 10.30: Mapa de trayectorias para el parámetro " $E_y$ " a partir de la "Moda 2".

(X:170000, Y:4449900)

(X:660000, Y:4449900)



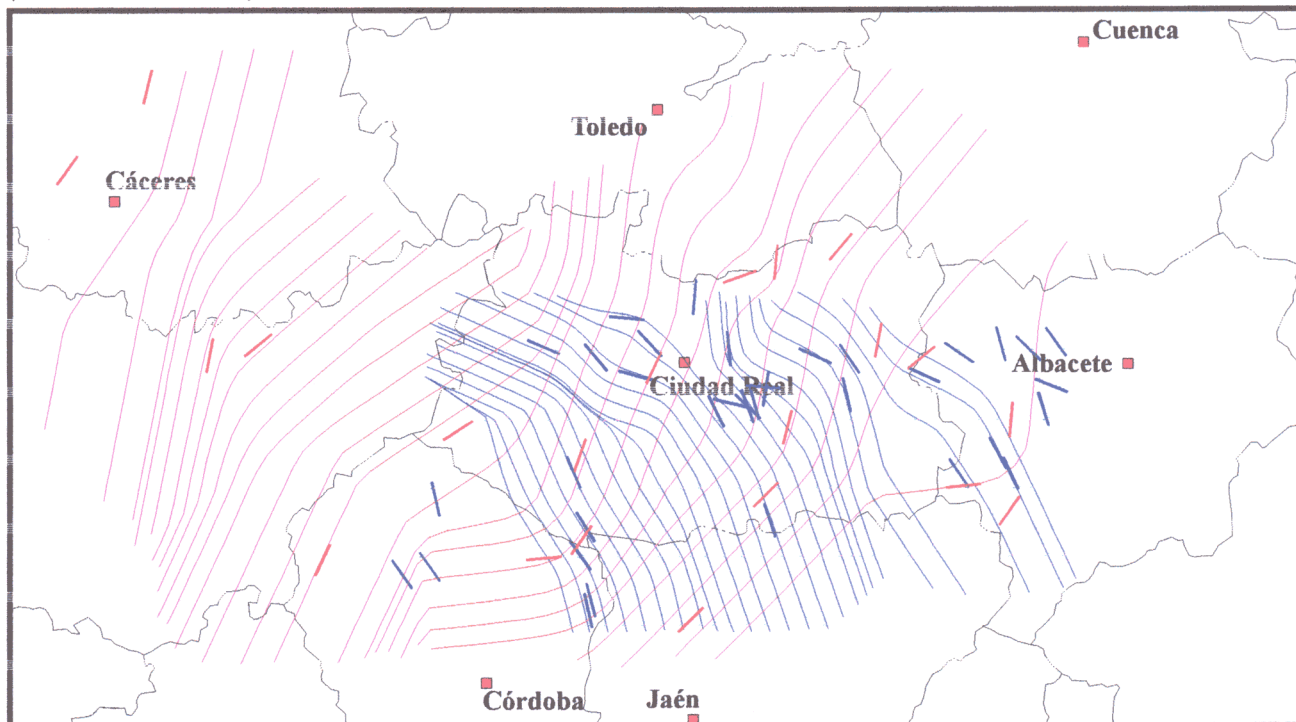
(X:170000, Y:4175100)

(X:660000, Y:4175100)

Figura 10.31: Mapa de trayectorias para el parámetro " $E_x$ " a partir de la "Moda 2".

(X:170000, Y:4449900)

(X:660000, Y:4449900)



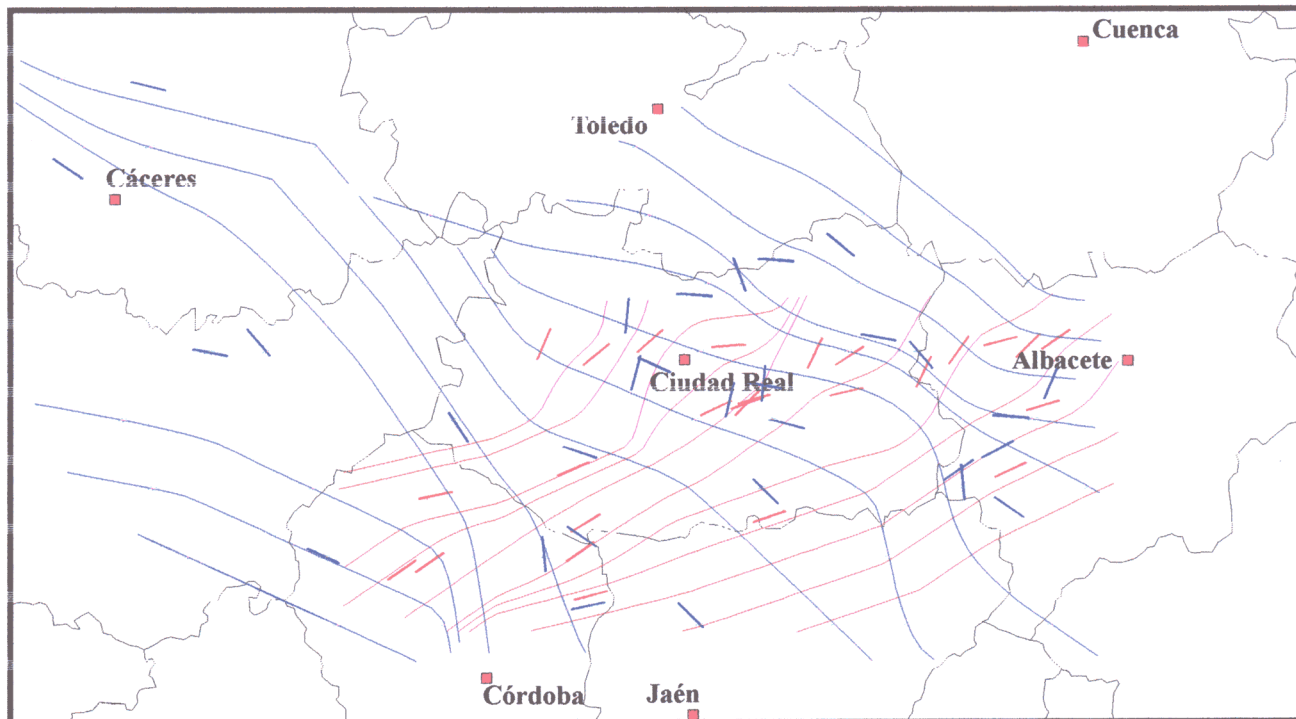
(X:170000, Y:4175100)

(X:660000, Y:4175100)

Figura 10.32: Mapa de trayectorias superpuestas para el parámetro "E," a partir de las modas "1" y "2".

(X:170000, Y:4449900)

(X:660000, Y:4449900)



(X:170000, Y:4175100)

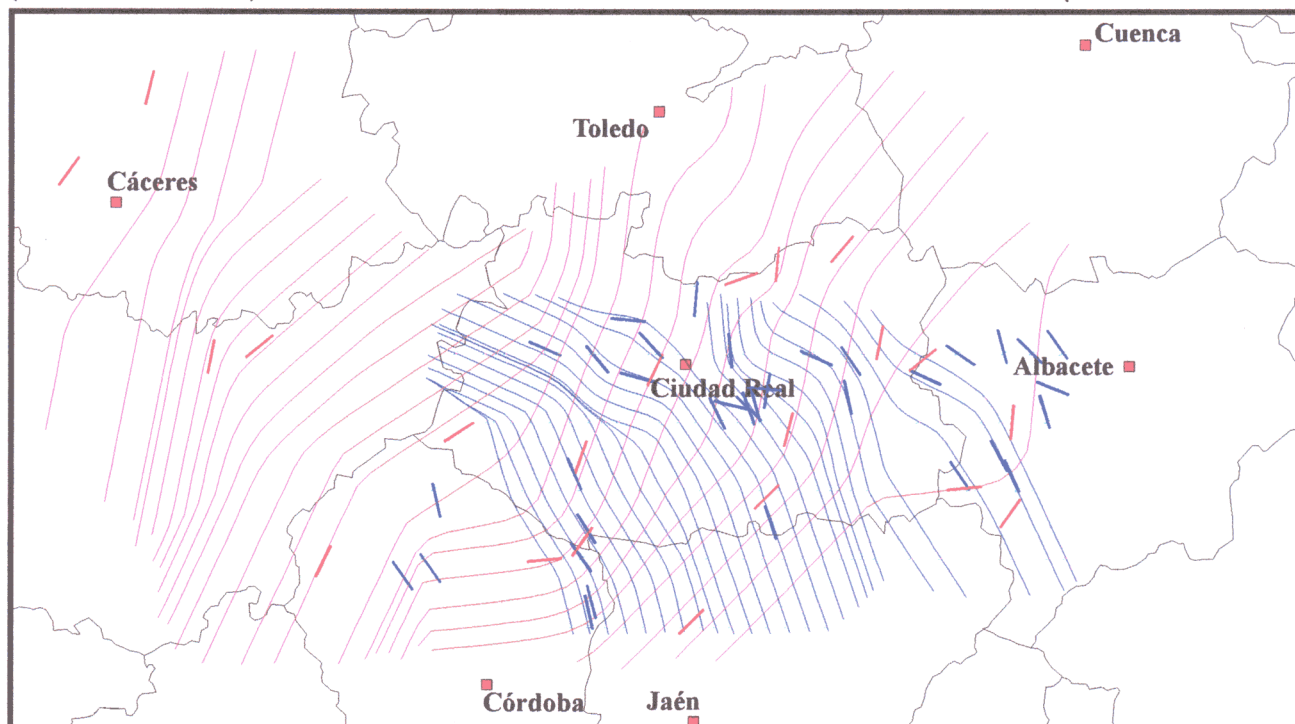
(X:660000, Y:4175100)

Figura 10.33: Mapa de trayectorias superpuestas para el parámetro "E<sub>x</sub>" a partir de las modas "1" y "2".



(X:170000, Y:4449900)

(X:660000, Y:4449900)



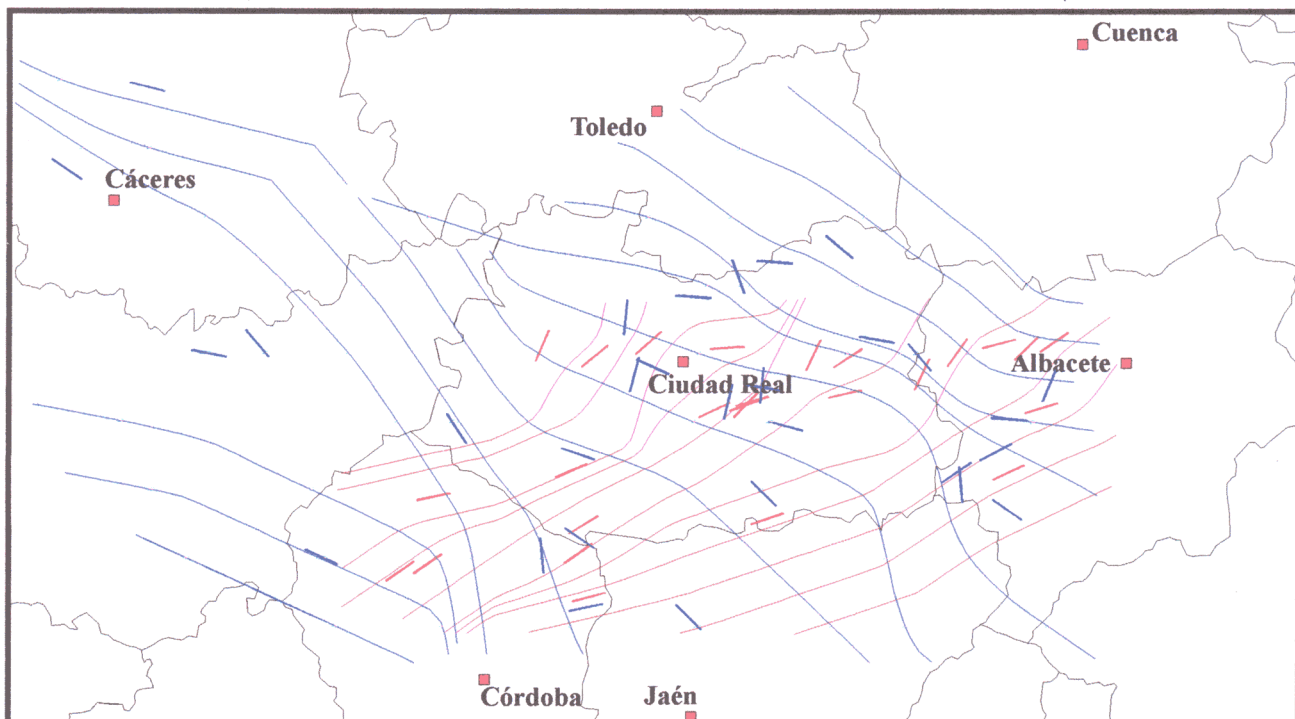
(X:170000, Y:4175100)

(X:660000, Y:4175100)

Figura 10.32: Mapa de trayectorias superpuestas para el parámetro " $E_y$ " a partir de las modas "1" y "2".

(X:170000, Y:4449900)

(X:660000, Y:4449900)



(X:170000, Y:4175100)

(X:660000, Y:4175100)

Figura 10.33: Mapa de trayectorias superpuestas para el parámetro " $E_x$ " a partir de las modas "1" y "2".

**ABRIR CONTINUACIÓN CAPÍTULO 10**

