

MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA
SECRETARIA DE LA ENERGIA Y RECURSOS MINERALES

EXPLORACION Y CARACTERIZACION DE PIZARRAS ORNAMENTALES EN EL SISTEMA CENTRAL

(PROVINCIAS DE MADRID, GUADALAJARA Y SEGOVIA). 1ª FASE

MEMORIA



INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA

11157

"EXPLORACION Y CARACTERIZACION DE PIZARRAS ORNAMENTALES EN
EL SISTEMA CENTRAL (PROVINCIAS DE MADRID, GUADALAJARA Y
SEGOVIA). 1ª FASE".

11157

El presente proyecto ha sido
realizado por EGEO, s.a. en
régimen de contratación con
el Instituto Geológico y Minero
de España.

Madrid, Mayo de 1.986

Los trabajos a los que corresponde el presente informe han sido realizados por el personal técnico que se relaciona a continuación:

González Lodeiro, Francisco (Universidad de Granada)

Lombardero Barceló, Manuel (EGEO, S.A.)

Martín Parra, Luis Miguel (EGEO, S.A.)

Muñoz de La Nava, Paulino (IGME)

Pablo Maciá, José de (EGEO, S.A.)

Rubio Ubeda, Vicente (EGEO, S.A.)

Villasante Pinto, Raul (EGEO, S.A.)

INDICE

1. <u>INTRODUCCION</u>	2.
1.1. ALCANCE DEL ESTUDIO	2.
1.2. ANTECEDENTES	3.
1.3. METODOLOGIA DEL TRABAJO	5.
1.4. RESULTADOS OBTENIDOS	7.
2. <u>GEOLOGIA GENERAL</u>	9.
2.1. SITUACION	9.
2.2. ESTRATIGRAFIA	10.
2.3. UNIDADES POTENCIALMENTE PRODUCTIVAS	20.
2.3.1. <u>Definición</u>	20.
2.3.2. <u>Formación R₂</u>	20.
2.3.3. <u>Formación R₃</u>	23.
2.3.4. <u>Formación R₄</u>	23.
2.4. TECTONICA Y METAMORFISMO	26.
2.4.1. <u>Tectónica prehercínica</u>	26.
2.4.2. <u>Fases hercínicas</u>	26.
2.4.3. <u>Fracturación tardihercínica y deformaciones posteriores</u> ...	32.
2.4.4. <u>Metamorfismo</u>	35.
3. <u>FASE DE EXPLORACION</u>	38.
3.1. CORTES GEOLOGICOS E. 1:25.000	38.
3.1.1. <u>Corte 1. RIOFRIO-BECERRIL. (Plano nº 2)</u>	38.
3.1.2. <u>Corte 2. EL MUYO-SANTIBAÑEZ. (Plano nº 3)</u>	40.
3.1.3. <u>Corte 3. Pto. de la QUESERA-CANTALOJAS (Plano nº 4)</u>	41.
3.1.4. <u>Corte 4. Rio JARAMILLA-Pico OCEJON (Plano nº 5)</u>	43.
3.1.5. <u>Corte 5. Pico SAN CRISTOBAL-TAMAJON (Plano nº 6)</u>	46.
3.1.6. <u>Corte 6. CERVERA-EL ATAZAR (Plano nº 7)</u>	48.
3.1.7. <u>Corte 7. Rio LOZOYA-TORTUERO (Plano nº 8)</u>	49.
3.1.8. <u>Corte 8. Arroyo de PELAGALLINAS (Plano nº 9)</u>	51.
3.1.9. <u>Corte 9. SANTOTIS-ROBREDARCAS (Plano nº 10)</u>	52.
3.1.10. <u>Corte 10. Rio BORNOVA-CAÑAMARES (Plano nº 11)</u>	53.

3.2. LABORES MINERAS ANTIGUAS	56.
3.3. RESULTADOS DE LA FASE DE EXPLORACION	60.
4. <u>FASE DE INVESTIGACION PREVIA</u>	61.
4.1. CARTOGRAFIA GEOLOGICA Y CORTES LITO-ESTRUCTURALES	61.
4.1.1. <u>Estructura general de las Zonas de Interés Prioritario</u> ...	61.
4.1.2. <u>Zona del Bornova-Rodada</u>	63.
4.1.3. <u>Zona de Los Prados-Valdejudios</u>	63.
4.2. SONDEO MECANICO	66.
4.3. ESTUDIO DE LA FRACTURACION	71.
4.3.1. <u>La fracturación como factor limitante de la explotabilidad.</u>	71.
4.3.2. <u>Método de estudio de la fracturación</u>	73.
4.3.3. <u>Fallas, diaclasas y otras discontinuidades</u>	80.
4.4. RESULTADOS DE LA FASE DE INVESTIGACION PREVIA	86.
5. <u>MUESTREO Y CARACTERIZACION TECNOLOGICA DE LAS PIZARRAS</u>	88.
5.1. MUESTRAS PARA PETROGRAFIAS	88.
5.1.1. <u>Metodología del muestreo y de las petrografías</u>	88.
5.1.2. <u>Petrografías</u>	93.
5.1.3. <u>Relación entre la petrografía y la calidad de las pizarras.</u>	95.
5.2. MUESTRAS PARA ENSAYOS TECNOLOGICOS	98.
5.2.1. <u>Metodología del muestreo y de los ensayos</u>	98.
5.2.2. <u>Caracterización tecnológica</u>	99.
5.2.3. <u>Relación entre las características tecnológicas y geológicas de la capa potencialmente explotable</u>	101.
6. <u>RECOMENDACIONES</u>	105.
7. <u>BIBLIOGRAFIA</u>	107.

1. INTRODUCCION

1.1. ALCANCE DEL ESTUDIO

Esta Memoria y sus correspondientes anexos, que se presentan en dos tomos aparte, recogen la metodología, datos y resultados obtenidos en el proyecto titulado "Exploración y caracterización de pizarras ornamentales en el Sistema Central (Provincias de Madrid, Guadalajara y Segovia) 1ª Fase", el cual se enmarca dentro del programa de acciones en apoyo al subsector minero de la pizarra que el IGME viene realizando desde 1977.

Su alcance puede fijarse en el de la Fase de Exploración abarcando también las etapas preliminares de la Fase de Investigación, según la metodología que para la investigación de pizarras han establecido BARROS et al. (en prensa), es decir, la determinación de las Areas de Interés Potencial y la preselección de ciertas Areas de Interés Prioritario, donde se centrarán las posteriores fases de investigación.

Por otra parte, la existencia de antiguas labores mineras artesanales en la comarca de Atienza (Guadalajara), donde incluso existió una pequeña explotación industrial de pizarras para cubiertas, hizo pensar en la probabilidad de favorables condiciones litológico-estructurales de la pizarra que podrían permitir su explotación actualmente. Con este punto de vista, el reconocimiento de dichas labores, así como de otras que se han podido localizar en el municipio de Majaelrayo, ha sido otro de los objetivos del estudio.

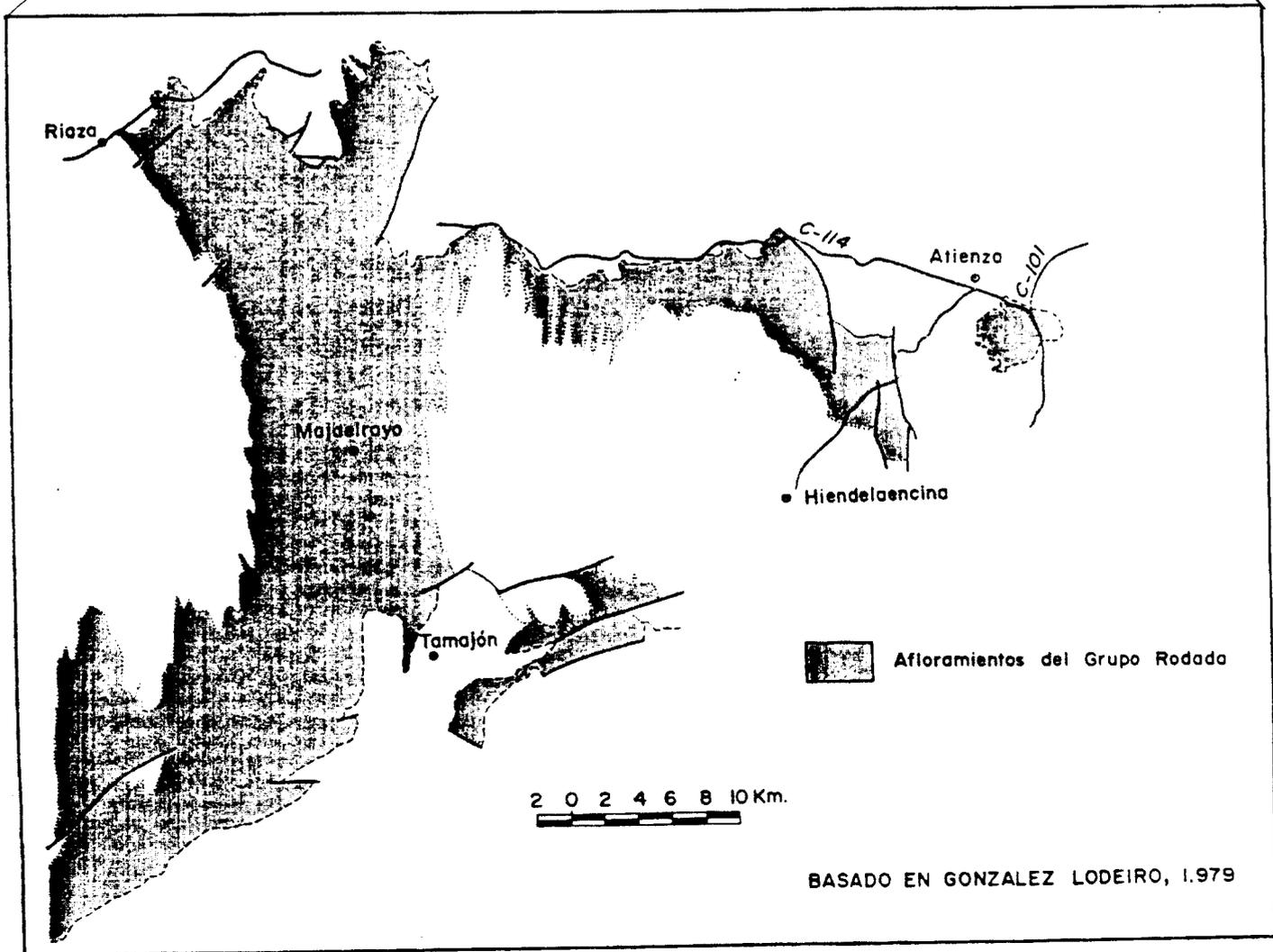
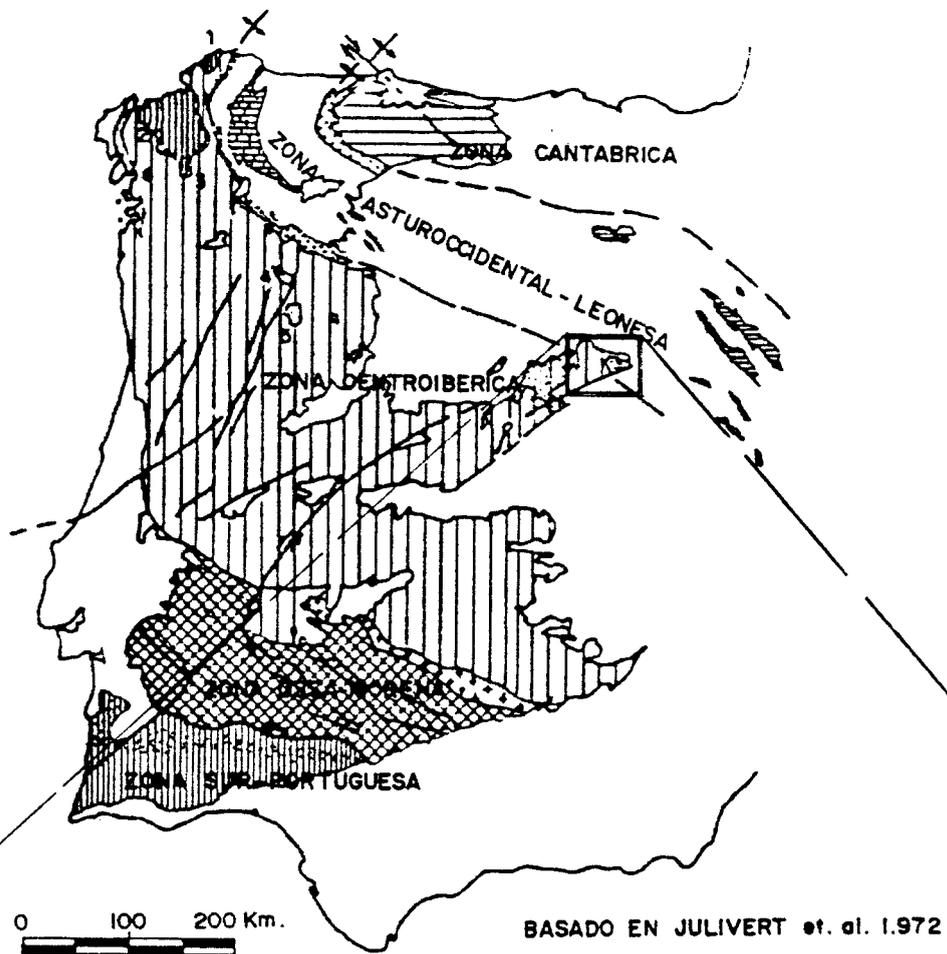
Por último, se pretendió caracterizar las pizarras que se consideraron potencialmente explotables, según las normas UNE de caracterización tecnológica de pizarras, recientemente aprobadas y publicadas.

1.2. ANTECEDENTES

El proyecto se centra en las formaciones geológicas del Ordovícico medio-superior que afloran extensamente en el segmento oriental del Sistema Central español (Fig. 1), formaciones equivalentes a las que en el Noroeste de España son intensamente explotadas y sirven de base a la importante industria de las pizarras para cubiertas (BARROS et al, 1984, 1985).

En el plano nº 1 se puede ver el área del estudio, que abarca unos 780 Km² aproximadamente. La región había sido estudiada previamente por diversos autores, tales como SOMMER (1965), SCHAFER (1969), SOERS (1972), BISCHOFF et al (1973), APARICIO & GALAN (1980), BISCHOFF et al (1980) y GONZALEZ LODEIRO (1981 a, 1981 b); recientemente han sido publicadas las hojas del MAGNA de Atienza (433), Barahona (434), Hiendelaencina (460) y Sigüenza (461) (ADELL et al, 1981 a, 1981 b, 1982 a, 1982 b), que en lo referente al Paleozoico, no modifican sustancialmente los citados trabajos de GONZALEZ LODEIRO.

Posteriormente se han realizado algunos estudios, sobre todo paleontológicos (GUTIERREZ MARCO, et al, 1984) y generales sobre el ordovícico (HAMMAN et al, 1982, FERNANDEZ CASAL & GUTIERREZ MARCO, en prensa) que aclaran aspectos cronológicos y relacionan las formaciones allí existentes con las del resto de la Península Ibérica.



SITUACION DEL AREA ESTUDIADA.

FIGURA 1

1.3. METODOLOGIA DEL TRABAJO

El equipo de personas que ha llevado a cabo el estudio posee ya una notable experiencia en trabajos de esta naturaleza, porque desde 1981 viene trabajando en el tema; la metodología de trabajo utilizada, que ha venido perfeccionándose desde entonces, viene reflejada en la citada comunicación de BARROS et al., (en prensa).

La Fase de Exploración se comenzó con una exhaustiva recopilación bibliográfica, que proporcionó los datos necesarios para poder sintetizar una cartografía previa (Plano nº 1), sobre la cual se planificaron una serie de itinerarios de campo que permitieron realizar los cortes geológicos, escala 1:25.000, que se presentan en los planos nº 2 a 11. Ellos han proporcionado una visión de conjunto de todas las formaciones potencialmente explotables (Plano nº 12), así como de las estructuras más importantes y del estilo de los pliegues.

Fundamentándose en los resultados anteriores, se planificó la Fase de Investigación Previa, que consistió en la selección de dos zonas, cercanas a Atienza (denominadas Zona de Bornova-Rodada y Zona de Los Prados-Valdejudíos), donde las características litológicas de la pizarra eran las mejores, cartografiándose a escala 1:25.000 (Plano nº 13). Se realizaron seis cortes litológico-estructurales, a escala 1:10.000, con el fin de reconstruir en detalle las macroestructuras presentes y de reconocer la capa potencialmente explotable (Planos nº 14 a 16).

En el proyecto se había previsto perforar 110 m. de sondeo de reconocimiento. A la vista de los resultados que se iban obteniendo en la investigación, se creyó preferible el realizar un único sondeo, que reconociese la capa potencialmente explotable en todo su espesor (que es cercano a los 100 m.), obteniendo muestras frescas de ella en profundidad, mejor que dispersar en varios sondeos cortos la escasa longitud de perforación disponible.

Además de lo anterior, durante la Fase de Investigación se tomaron una serie de bloques-muestra y de muestras de placas de pizarra elaborada de antiguas explotaciones existentes en la Zona de BORNOVA-RODADA, que se sometieron a los ensayos tecnológicos pertinentes (véase

el apartado 5.2) con el fin de caracterizar las pizarras de la capa potencialmente explotable.

Como mejoras metodológicas, en este trabajo se han utilizado ciertas técnicas que en anteriores estudios solamente se habían apuntado o no se habían usado en absoluto. Podemos destacar tres de ellas:

* El muestreo sistemático, con muestra orientada en el espacio (midiendo y marcando en ella la orientación de un plano), para obtener despues una o varias láminas delgadas orientadas se ha revelado como una valiosa herramienta, en formaciones de pizarras masivas, para detectar microestructuras (estratificación, esquistosidades de crenulación, microfracturas) no observables en el campo. Estas microestructuras pueden medirse en la lámina y orientarse, trasladando despues estas orientaciones al mapa, con lo que es posible reconstruir estructuras mayores. Además, se ha evidenciado una estrecha relación entre el aspecto microscópico y la calidad de las pizarras (Apartado 5.1.3).

* La medida y el tratamiento de los datos de fracturación sobre testigo de sondeo (que se explica detalladamente en el apartado 4.3) permite correlacionar los datos de superficie con los tomados en profundidad, separando las familias de diaclasas regionales de las locales superficiales.

* El muestreo sistemático, según la dirección perpendicular a la de la estructura, de la capa potencialmente explotable, sometiendo despues las muestras al ensayo de cambio térmico y observando las alteraciones producidas, se ha mostrado útil en la detección de niveles más o menos alterables dentro de dicha capa (veáse el apartado 5.2).

1.4. RESULTADOS OBTENIDOS

El estudio ha cubierto a satisfacción todos los objetivos propuestos en el anteproyecto.

En la Fase de Exploración se observó que la única formación potencialmente explotable es la denominada Formación Rodada 4, o abreviadamente R_4 , equivalente litológicamente al Miembro Medio de la Formación Agüeira que es intensamente explotado en las comarcas de Valdeorras (Orense) y La Cabrera (León) (BARROS et al, 1985). Se desecharon las formaciones R_1 , R_2 (equivalente a las Pizarras de Luarca), R_3 y R_5 , fundamentalmente por no reunir las características litológicas adecuadas; únicamente en la parte baja de la Formación R_3 se localizaron algunas capas de pizarra de mejor calidad, que también se desecharon dada su reducida potencia (unos pocos metros).

La Formación R_4 aflora en dos áreas bastante separadas geográficamente: una al S y SE de Riaza (Segovia) y otra en la comarca de Atienza (Guadalajara). En la primera de ellas, razones estructurales (la esquistosidad principal, que forma los planos de fisilidad de la roca, es del tipo espaciado de crenulación) impiden su aprovechamiento como pizarra para cubiertas. Por tanto, se seleccionó la segunda como Zona de Interés Prioritario, centrando en ella la Fase de Investigación posterior.

Como logros secundarios, pero no por ello menos importantes, de la Fase de Exploración pueden mencionarse también: la realización de siete de los diez cortes y columnas litoestratigráficas en áreas aún no cartografiadas por el plan MAGNA; la modificación de la interpretación estructural del Sinclinal de Majaelayo hecha por GONZALEZ LODEIRO (1981 b); la correlación de las antes mal definidas unidades litoestratigráficas situadas al E del Sinclinal de Majaelayo con las de éste, que nosotros definimos con el rango de Formación y nombramos (respetando la nomenclatura anterior) como formaciones Rodada 1 a Rodada 5, comprendidas todas dentro del Grupo Rodada; el hallazgo de fósiles en uno de los

cortes, que han permitido hacer precisiones cronológicas en la Formación R₂; y el descubrimiento de varias antiguas explotaciones de pizarra, de las que no se tenía noticia, y cuya situación se incluye en el apartado 3.3.

La Fase de Investigación ha reducido aún más las áreas con posibilidades de explotación, ya que los afloramientos de R₄ están afectados en muchos lugares, por discontinuidades estructurales importantes. Ello, junto con los datos obtenidos en el sondeo, ha permitido marcar tres áreas, relativamente pequeñas (véase el apartado 4.4) donde centrar los trabajos de futuros proyectos.

Por último, el muestreo y los ensayos han caracterizado las pizarras como PAI (Pizarras para ambientes intermedios), según las normas UNE.

La Fase de Investigación ha mejorado notablemente la cartografía MAGNA existente en la zona, retocando los contactos entre las formaciones R₂, R₃, R₄ y R₅, precisando la estructura, detallando y proporcionando una serie de datos que apuntan a un modelo sedimentario concreto (apartado 2.2).

2. GEOLOGIA GENERAL

2.1. SITUACION

La Figura 1 ilustra la situación geográfica y geológica, dentro del Macizo Hespérico español, del área de estudio. De las varias divisiones que se han hecho del Macizo, se ha representado la de JULIVERT et al., (1977), según la cual el área está comprendida dentro de la Zona Centroibérica; GONZALEZ LODEIRO (1981 b) se inclina también por esta división, aunque algunas de las características de la zona antedicha no sean totalmente correctas para el extremo oriental del Sistema Central.

Basándonos en anteriores trabajos realizados por el equipo que suscribe el presente (BARROS et al., 1984, 1985), hemos de hacer notar la gran similitud litoestratigráfica entre los materiales ordovícicos del Dominio de Truchas y los del area del estudio, y la diferencia que existe con los del Dominio del Navía-Alto Sil (ambos incluidos en la Zona Asturoccidental-Leonesa, MARCOS, 1973; PEREZ-ESTAUNN, 1978) del NO de la Península Ibérica. El estilo de plegamiento, sin embargo, es más parecido al del segundo dominio que al del primero.

En nuestra opinión, y con criterios estrictamente estratigráficos, parece más adecuado correlacionar el Dominio de Truchas y el extremo oriental del Sistema Central, que podrían constituir un unico dominio dentro de la Zona Centroibérica. Por otra parte, MARTINEZ CATALAN (1985) también excluye, en base a criterios estratigráficos, el Dominio de Truchas de la zona Asturoccidental-Leonesa, contrariamente a lo propuesto por MARCOS y PEREZ-ESTAUNN (op. cit), lo que apoya también nuestra propuesta

2.2. ESTRATIGRAFIA

Muy brevemente describimos la estratigrafía de los materiales investigados, basándonos en las columnas levantadas en el trabajo (Plano nº 12) y en datos bibliográficos, fundamentalmente de BISCHOFF et al., (1980), GONZALEZ LODEIRO (1981 b), HAMMAN et al., (1982), GUTIERREZ MARCO et al., (1983), FERNANDEZ CASAL & GUTIERREZ MARCO (en prensa) e IGME (inédito).

De muro a techo se encuentran las siguientes formaciones:

* Formación Constante. Consiste en una alternancia de esquistos y pizarras granatíferas con cuarcitas en bancos delgados (decimétricos). Los miembros inferiores de la Formación solo han sido visitados en algunos puntos; por ejemplo, en la carretera Atienza-Hiendelaencina cerca de la aldea de Naharros (WL 0666.5615), se observan las capas conglomeráticas basales. Tanto el espesor total de la formación (de 450 a 700 m.) como el de sus miembros, varían mucho lateralmente, así como también las litologías. Se han citado icnofósiles (Cruziana furcifera, Scolitus) en esta Formación, que la sitúan cronológicamente en el Arenig (Ordovícico Inferior), aunque su parte baja podría pertenecer al Tremadoc; sin embargo, esto último no ha sido nunca probado con argumentos paleontológicos.

* Formación Alto Rey. Es correlacionable con la Cuarcita Armoricana del resto del Hercínico de Europa Occidental y Marruecos. En alguna publicación, se han diferenciado tres facies litológicas: facies arenítica (cuarcitas y ortocuarzitas en bancos métricos), facies heterolítica (ortocuarzitas y cuarcitas sericíticas en bancos decimétricos, pizarras cuarzosas, filitas y filitas con laminaciones arenosas) y facies pelítica (filitas y pizarras con escasas laminaciones arenosas); en los cortes realizados, la facies que mejor se observa es la primera, ya que su dureza y masividad hacen que forme resaltes del pliegue resistentes a la erosión. Su espesor es cercano a los 120 m. (se han citado espesores de 40 a más de 300 m.).

La edad de la Formación es Arenig, ya que en ella se encuentran numerosos icnofósiles atribuibles a este piso.

Por encima de la Formación Alto Rey y hasta la Formación Santibañez existen cinco unidades litoestratigráficas que, hasta ahora, no han sido definidas formalmente, existiendo cierto confusionismo respecto de sus denominaciones. FERNANDEZ CASAL & GUTIERREZ MARCO (en prensa) recopilan los nombres existentes y proponen una división (no formal) de lo que ellos denominan "Grupo Rodada" en cuatro formaciones, algunas de ellas subdivididas en miembros. No estamos de acuerdo con ello, ya que a nuestro juicio, existen suficientes criterios para definir cinco unidades, más o menos homogéneas pero que se adaptan a la definición

normalmente aceptada del término Formación (BATES & JACKSON, 1980).

Por ello, proponemos denominar Formación Rodada 1 a Formación Rodada 5 (abreviadamente R₁, R₂, R₃, R₄ y R₅) las cinco unidades litoestratigráficas situadas por encima del último banco potente de cuarcita de la Formación Alto Rey y por debajo de las cuarcitas blancas de la Formación Santibañez (infrayacentes al Silúrico datado), ambas capas-guia del ordovícico de la zona. A continuación se describen esas formaciones, cuya extensión de afloramiento se ve en la Figura 1.

* Formación Rodada 1, (R₁). Es correlacionable con muchas otras formaciones similares del NO Peninsular (Serie de Transición, Capas de Transición) y aunque algunos autores la incluyen como el miembro superior de la Cuarcita Armoricana nosotros preferimos considerarla una Formación independiente, siguiendo los criterios expuestos en publicaciones modernas.

Consiste en una alternancia de cuarcitas y areniscas (en bancos decimétricos) y pizarras (en bancos decimétricos a milimétricos) con espesor de 90 a 130 m. Microscópicamente (veáanse las muestras 399/85-433-GU-LB/144 y 399/85-432-GU-PM/1, Anexo 2) están compuestas de micas blancas (moscovita-sericita), clorita, cuarzo, ilmenita y otros opacos, las capas pelíticas; mayor porcentaje en cuarzo y abundancia de minerales detríticos accesorios tal como la turmalina, se observan en las capas arenosas.

El tránsito con la Formación suprayacente (R₂) es gradual, mediante la desaparición de las capas arenosas, por lo que cartográficamente es a veces difícil situar el contacto entre ambas.

R₁ ha sido atribuida al Arenig, por algunos ejemplares de Cruziana hallados en ella.

* Formación Rodada 2, (R₂). Esta formación es correlacionable con las típicas pizarras negras del ordovícico medio del resto del Hercínico europeo, antiguamente conocidas como "Capas con Calymene tristani", y que biostratigráficamente está caracterizada por varias especies de Neseuretus y graptolitos; en España se la conoce como "Pizarras de Luarca" en el NO y otros nombres locales.

En principio, se consideró como unidad de interés potencial, por correlación con las "Pizarras de Luarca", intensamente explotadas en el NO de España, y los "Schistes d'Angers" del Macizo Armoricano francés, donde se localizan las más famosas explotaciones subterráneas de pizarras.

Litológicamente, la Formación es, casi exclusivamente, una masa de pizarras negras, grises oscuro y grises, con tamaño de grano variable pero en general, de medio a muy grueso, frecuente presencia de pirita y otros sulfuros oxidables que a veces se acumulan en los planos de esquistosidad y estratificación y bajo grado de fisilidad. Localmente, se han encontrado capas aisladas de arenisca de espesor métrico, laminaciones arenosas de espesor milimétrico a centimétrico (más frecuentes hacia el techo y el muro de la Formación) y algunas capas limolíticas; en éstas son frecuentes las estructuras orgánicas de bioturbación. En el corte nº 9 se encontró un yacimiento fosilífero de braquiópodos y bivalvos (veáse la muestra 399/85-460-GU-MP/9, Anexo 2).

La estratificación, salvo que se encuentren capas arenosas, es difícilmente observable en el afloramiento, cosa que no ocurre a mayor escala (fotografía nº 1) ya que es posible, a veces, apreciar la estratificación en vistas panorámicas de los macizos rocosos.



FOTOGRAFIA N° 1.- Aspecto de los extensos afloramientos de pizarras de R_2 en el Sinclinal de Majaelrayo. Observése la estratificación, buzando hacia la izquierda, y el intenso diaclasado. Ladera occidental del Pico Ocejón, E. a la derecha.



FOTOGRAFIA N° 2 (Microfotografía n° LB/167-A). Pizarras de R_2 al microscopio. Observése que el grado de orientación de los filosilicatos no es demasiado alto. Zona de Los Prados-Valejudios. X 22, NX.

Por tanto, la reconstrucción de la estructura y el cálculo de potencias en esta formación es siempre problemático y sujeto a cierto grado de incertidumbre. No obstante, estimamos que el espesor de R₂ es de unos 600 m., que está en el mismo orden de magnitud que los datos bibliográficos modernos.

Al microscopio las pizarras aparecen como una masa de filosilicatos tipo mica blanca (moscovita-illita-sericita) y clorita, con textura lepidoblástica fuertemente orientada, porfiroblastos de clorita (Fotografía nº 2), cuarzo, a veces porfiroblastos de cloritoide y de ilmenita acicular y opacos (veáanse la Tabla I, página 89, y las correspondientes fichas petrográficas del Anexo 2). Se ha citado la presencia de biotita y de nódulos fosfatados cerca del muro.

A la Formación R₂ tradicionalmente se la ha asignado una edad Llanvirn-Llandeilo.

* Formación Rodada 3, (R₃). Litológicamente, se parece al Miembro Inferior de la Formación Agüeira del Dominio de Truchas, aunque su espesor aquí es mucho mayor. Consiste en un conjunto de cuarcitas, areniscas, pizarras con laminaciones arenosas y pizarras limolíticas y limolitas de espesor comprendido entre 450 y 650 m., correspondiendo las mayores potencias a la parte occidental de la zona de estudio (Sinclinal de Majaelrayo) y las menores a la oriental (comarca de Atienza). En principio puede ser dividida en dos miembros (no representados en los planos), uno inferior donde las pizarras con laminaciones pizarras limolíticas y limolitas predominan sobre los sedimentos gruesos, cuya base constituye el tránsito con la infrayacente R₂, y otro superior, donde las areniscas y cuarcitas constituyen las litologías más importantes. En este miembro superior, cuya potencia es aproximadamente la tercera parte de la de la Formación, se han citado y nosotros hemos también encontrado capas lentejonares de rocas calcáreas, de espesor decimétrico y extensión lateral métrica a decamétrica. Se trata de areniscas con cemento calcáreo bioturbadas, de color pardo por alteración (ya que en una muestra fresca, la 399/85-433-GU-LB/190, obtenida del testigo de sondeo, el color es el blanco), que al microscopio aparecen como un conjunto de granos de cuarzo detríticos, escasamente orientados, acompañados de algunas moscovitas, cloritas y minerales detríticos accesorios, cementados por dolomita esparítica recristalizada; el porcentaje de ésta es minoritario, entre el 10 y el 40% de la roca. Litológicamente, son bastante diferentes de las dolomias calcáreas encontradas en el Miembro Inferior de la Formación Agüeira en el Dominio de Truchas (BARROS et al., 1981), las que además, contienen restos fósiles (artejos de crinoides).

Esta formación ha sido atribuida al Llandeilo por algunos autores, mientras que otros comparan los lentejones dolomíticos descritos arriba con las calizas del Ashgill. de otros puntos del Macizo Ibérico, con lo que la edad de la Formación podrá ser Llandeilo-Ashgill, aunque también consideran la posibilidad de que exista una discordancia entre los lentejones y el subyacente, con lo que la edad de R₃, sería problemática.

Nosotros hemos encontrado en R₃, especialmente en su Miembro Superior estructuras sedimentarias de tormenta, formando secuencias de DOTI completas o incompletas, con estratificación hummocky, (Fotografía nº 3), laminaciones paralela y cruzada (Fotografía nº 4), bioturbación (Fotografía nº 5), ripples de oscilación y de corriente estratificación lenticular y flaser, etc. Hemos de hacer notar que se encuentran carbonatos a diferentes alturas dentro del Miembro Superior de R₃, por lo que existen dos posibilidades: que las rocas calcáreas representen un único horizonte en cuyo caso, éste o el techo de R₃ sea heterocrono; o bien que sean más de uno los niveles calcáreos discontinuos (nosotros nos inclinamos por esta segunda posibilidad).



FOTOGRAFIA N° 3.- Estratificación hummocky en las areniscas del tramo superior de R_3 . Las ondulaciones más evidentes están dentro de los bancos de la parte media de la fotografía. Molino del Bornova, zona Bornova-Rodada, NE. a la derecha.



FOTOGRAFIA N° 4.- Laminaciones paralelas y cruzadas en las areniscas del tramo superior de R_3 . Arroyo de Reduvia, corte n° 4.

* Formación Rodada 4, (R₄). Es correlacionable, a grandes rasgos, con la parte inferior del Miembro Medio de la Formación Agüeira del Dominio de Truchas. Está constituida por 100 m. de pizarras gris oscuro, homogéneas, con muy escasas laminaciones menores (más abundantes a techo y muro). Suele contener pequeños clastos aislados de arenisca calcárea, litológicamente muy parecidos a los lentejones dolomíticos de R₃, microscópicos en la comarca de Atienza y milimétricos en la parte N. del Sinclinal de Majaelrayo (comarca de Riaza a Santibañez de Ayllon); en esta última, se encontró un único canto de grandes dimensiones (Fotografía nº 6; muestra 399/85-432-SG-VP/115, Anexo 2).

Al microscopio están compuestos principalmente de filosilicatos tipo mica blanca, clorita, cuarzo, fragmentos de roca (clastos) opacos y minerales detríticos accesorios. Están fuertemente orientados, formando una esquistosidad continua, que a veces se ve afectada por crenulaciones y esquistosidades espaciadas posteriores (vea la Tabla I, página 89) y las correspondientes fichas petrográficas en el Anexo 2).

La Formación, considerada potencialmente explotable, ha sido reconocida en detalle en la Fase de Investigación y perforada por un sondeo, describiéndose minuciosamente más adelante.

No hay datos paleontológicos sobre ella. En base a correlaciones con unidades similares de la Cordillera Ibérica y del NO, se ha situado el límite Ordovícico-Silúrico en las dolomías de R₃, con lo que R₄ sería Silúrico Inferior, aunque otros autores lo sitúan dentro del conjunto R₄+ R₅, o bien en R₅.

* Formación Rodada 5, (R₅). Equivale litológicamente a algunas capas de "Pizarras con cantos" de los miembros Medio y Superior de la Formación Agüeira en el Dominio de Truchas. Se caracteriza, precisamente, por la presencia de clastos de arenisca calcárea, (Fotografía nº 7) similares a los que se encuentran en R₄, pero de mayor tamaño (centimétrico). Normalmente estos clastos han desaparecido, encontrándose solamente huecos de disolución; solamente en los de mayor tamaño quedan, a veces, restos sin disolver que dan reacción positiva al ClH. Los cantos están englobados en litologías que van de pizarra de grano muy grueso y limolitas, a areniscas, pero nunca en pizarras de grano medio o fino. No en toda la columna de esta Formación aparecen los clastos, sino que parecen existir dos capas, a techo y muro de ella, donde son mucho más abundantes. El aspecto microscópico de las muestras de esta formación puede consultarse en las correspondientes fichas del Anexo 2 (véase también la Tabla I, página 89).

Su espesor varía de 80 a 170 m., estando los mayores espesores en la parte occidental de la comarca de Atienza (Zona del BORNOVA-RODADA).

Las formaciones R₄ y R₅, en su conjunto, han sido relacionadas con las "pelitas con fragmentos" del resto del Macizo Ibérico, en las que HAFENRICHTER (1980) sitúa el límite Ordovícico-Silúrico.

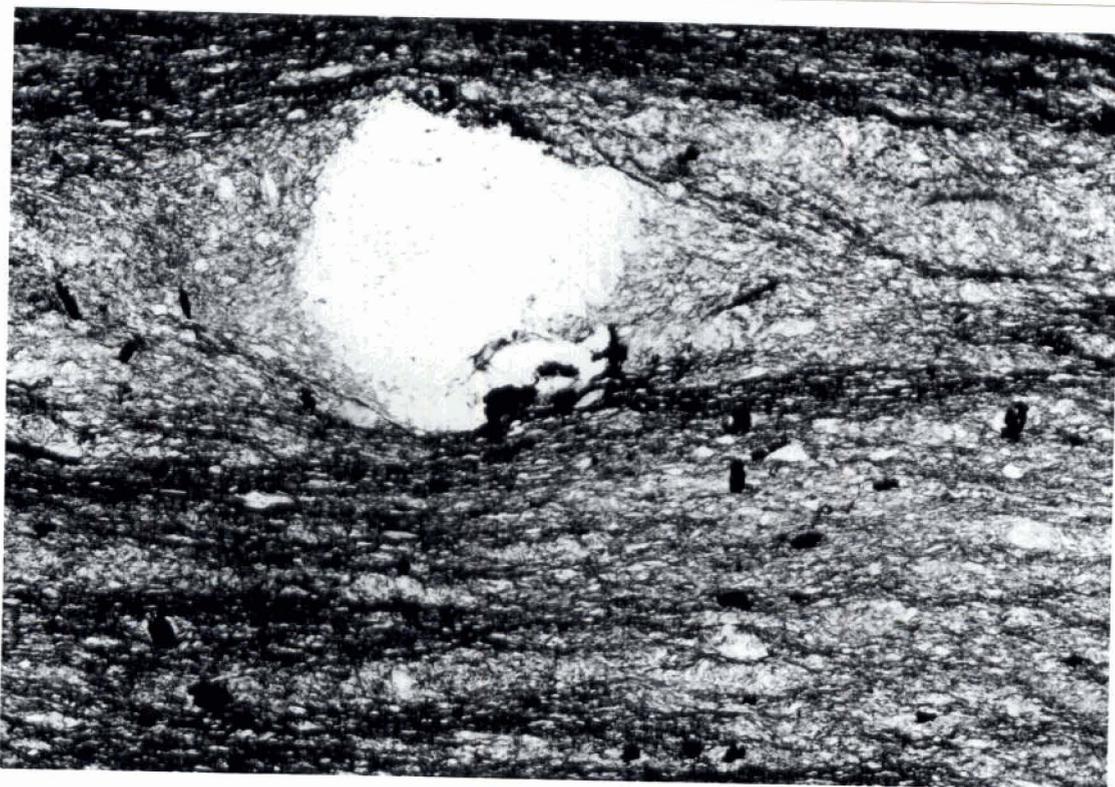
El medio sedimentario en que se depositaron las formaciones anteriormente descritas fué el de una extensa plataforma marina poco profunda, donde barreras de islas arenosas separan ambientes sedimentarios ligeramente diferentes, que actualmente están representados por las diversas litologías. Las cuarcitas masivas (facies arenítica de la Formación Alto Rey) corresponden a ambientes sub a supramareales; las facies heterolí-



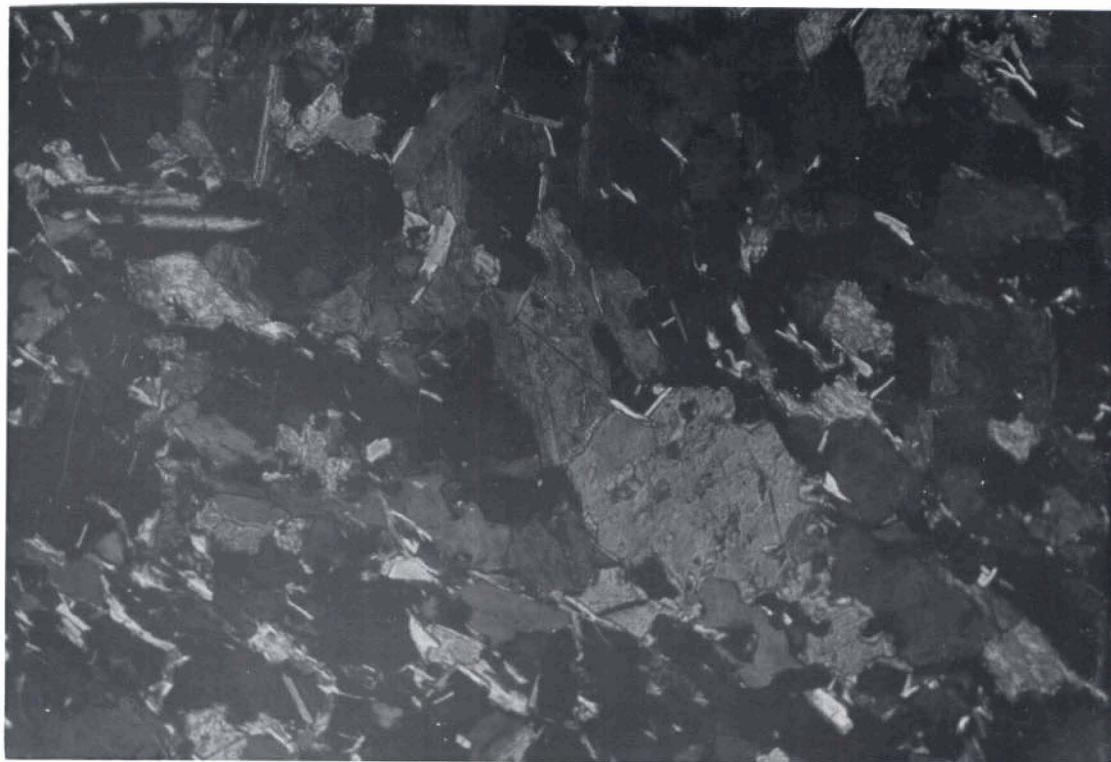
FOTOGRAFIA Nº 5.- Bioturbación en las capas limolíticas de la parte inferior de R₃. Arroyo del Hocino, corte 7.



FOTOGRAFIA Nº 6.- Gran canto de arenisca con cemento dolomítico engastado dentro de las pizarras de R₄. Al NO. de Becerril (Segovia). Corte 1.



FOTOGRAFIA Nº 7 : (Microfotografía nº LB/163-A).- Hueco producido por disolución de un canto, posiblemente calcáreo, en las limolitas arenosas de R5. Observéese la gran sombra de presión. Zona Los Prados-Valdejudios. X 55, NX.



FOTOGRAFIA Nº 8 (Microfotografía nº VP/115.A).- Arenisca cuarzosa cementada por dolomita esparítica. Al NO. de Becerril (Segovia). Corte 1.

ticas de la Formación Alto Rey, así como las litologías más arenosas de la Formación Constante, R_1 y R_3 son de llanura de marea, fuertemente influidas por las tormentas. Las facies pelíticas de las formaciones Constante, Alto Rey, R_1 , R_3 y R_4 , y quizás también R_2 , podrían corresponder a sedimentos de laguna costera (lagoon), también retrabajados por el oleaje y las corrientes de las tempestades; esta última formación (R_2) para algunos autores representa el climax de una fase transgresiva, interpretándola como antiguos sedimentos fangosos de plataforma más profunda, en conexión directa con el mar abierto. Sin embargo, R_4 presenta características litológicas similares a R_2 , aunque menor espesor, por lo que debería ser interpretada de la misma forma, pero aquella está intercalada entre otras dos formaciones arenosas que parecen ser de poca profundidad, por lo que nos inclinamos a pensar que, tanto R_4 como R_2 fueron sedimentos finos de aguas tranquilas y poco profundas.

Mención a parte merece la presencia de areniscas dolomíticas en R_3 ; como hemos dicho antes, pensamos que son varios los niveles discontinuos de carbonatos en el tercio superior de R_3 . Su forma lentejona, poco espesor y aspecto microscópico (Fotografía nº 8), por el que se ve que los carbonatos cementan los granos de cuarzo de una antigua arenisca, relleno de los huecos, junto con el hecho de que se encuentren en una formación depositada en una llanura de marea de poca profundidad, nos hace pensar en un origen edáfico en áreas localmente emergidas durante el Ordovícico Medio.

Respecto de la presencia de cantos de areniscas dolomíticas, similares litológicamente a los lentejones anteriores, en R_4 y sobre todo en R_5 , tanto en el Dominio de Truchas, como en Cabo Ortegá (Cantera de pizarra de Monte Rande) hemos visto formaciones similares. FORTUIN, 1984, describe las "Pizarras de Orea" que tienen características muy parecidas también, y las identifica con antiguos sedimentos glaciomarinós (paratillitas); las correlaciona con formaciones similares (Pélites à Fragments) del Macizo Armoricano, depositados todos en una cuenca marginal de un microcontinente (Armorica), separado de Gondwana, en aquellos tiempos cubierto por los hielos de una glaciación.

Sobre el Grupo Rodada se disponen otras unidades pertenecientes al Silúrico y Devónico, que no tienen interés para el presente trabajo. Pese a ello, se describen sucintamente las dos más bajas, ya que se han representado en algunos de los planos:

* Formación Santibañez. Es correlacionable con otras formaciones cuarcíticas situadas bajo las ampelitas silúricas (Cuarcita de Pumares del Dominio de Truchas, Cuarcita de Vega del Dominio del Navía-Alto Sil. Consisten en 20 a 35 m. de cuarcitas de tonos claros (blanco y crema) en bancos gruesos (2 a 3 m), con laminaciones cruzadas. Constituye una buena capa-guia.

No existen datos sobre su edad y ambiente sedimentario.

* Formación Cañamares. Es similar a muchas otras formaciones del Silúrico Inferior datado del Macizo Ibérico. Lo más característico de él es la presencia de pizarras ampelíticas negras, grafitosas, con mucha pirita, en las que se encuentran abundantes graptolitos del Llandovery.

2.3. UNIDADES POTENCIALMENTE PRODUCTIVAS

2.3.1. Definición

Por unidades potencialmente productivas entendemos aquellas unidades litológicas que, en base a los datos bibliográficos y a los resultados de la Fase de Exploración (Cortes y/o Cartografía 1:25.000, columnas litoestratigráficas a nivel de formaciones etc), presenten unas características litológicas adecuadas para su aprovechamiento como pizarras ornamentales, especialmente pizarras para cubiertas. Es decir, se tratará en general de unidades (sean formaciones, miembros o capas) pizarrosas, con escasas laminaciones arenosas, grano medio fino o muy fino, pocos minerales metálicos oxidables y la suficiente homogeneidad textural y el grado metamórfico adecuado para que posean un alto grado de fisilidad (o sea, una buena aptitud a la hienda).

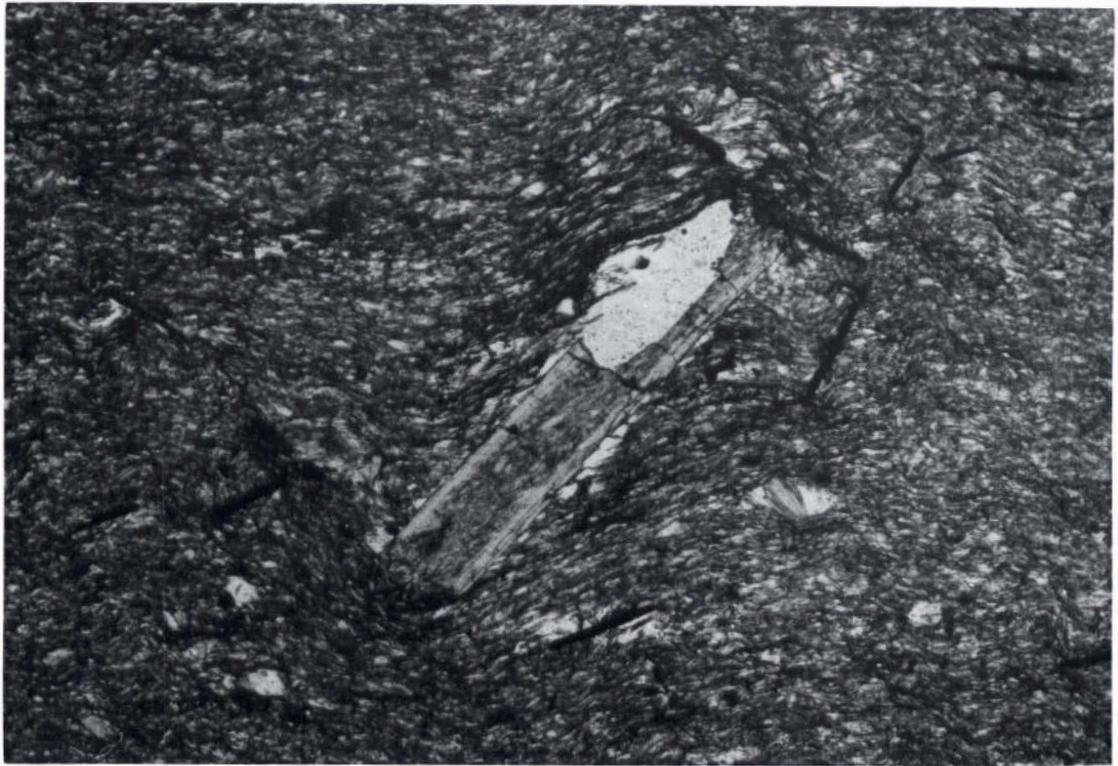
Además, han de poseer la suficiente potencia, en general, superior a 20 m., como para formar macizos rocosos lo bastante grandes para poder establecer un amplio frente de cantera.

En este sentido, de los datos bibliográficos, se consideró en principio que las formaciones R_2 , R_3 y R_4 podrían reunir las características antedichas. Sin embargo, como resultado de la Fase de Exploración, dos de ellas fueron descartadas por las razones que se exponen más abajo.

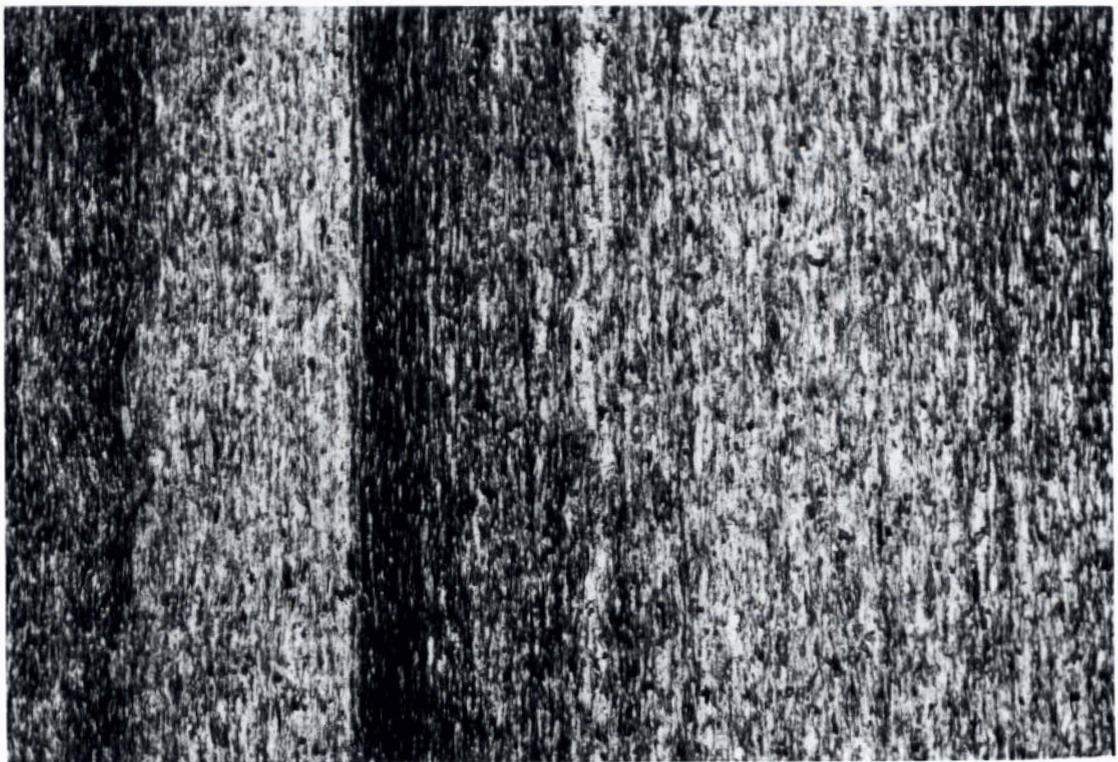
2.3.2. Formación R_2 .

Los datos bibliográficos previos daban un espesor de 700 a varios miles de metros a esta unidad, hecho que posteriormente no se ha visto confirmado, ya que la potencia real no supera los 600 m.

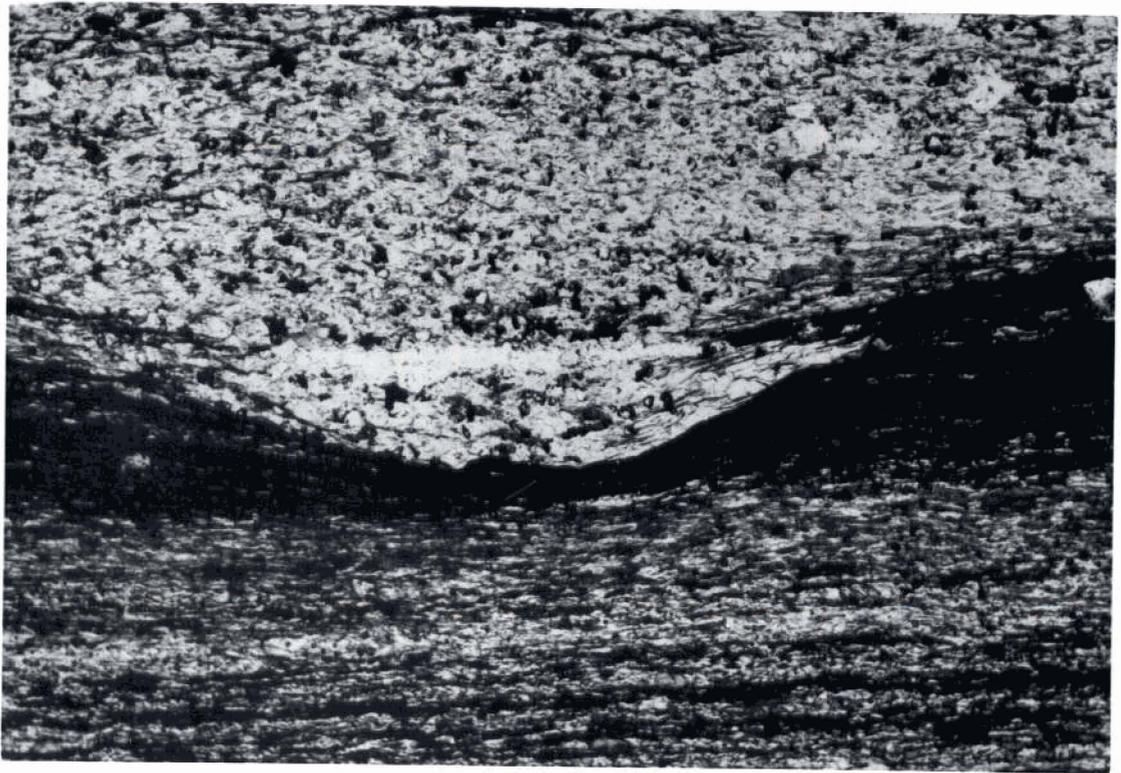
Aunque su composición mineralógica es adecuada, en general esta formación posee una muy notable heterogeneidad textural, que se observa perfectamente al microscopio, debido a la abundancia de microporfiroblastos de clorita, cloritoide, granate e ilmenita (Fotografía nº 9), microclastos y la presencia de delgadísimas laminaciones arenosas, en las que se observan incluso microestructuras sedimentarias (Fotografía nº 10 y nº 11). Además, son muy frecuentes las capas con muchos minerales oxidables, especialmente pirrotina en nódulos.



FOTOGRAFIA N° 9 (Microfotografía n° VP/100-A).- Cristal de cloritoide de 1,5 mm de longitud aproximada cortando a la esquistosidad S_1 y rodeado por la crenulación de F_3 , en pizarras de R_2 . Al O. del embalse del Vado (Guadalajara). Corte 5 . . X 22, N// .



FOTOGRAFIA N° 10 (Microfotografía n° MP/4-A).- Granoselección positiva en pizarras con laminaciones arenosas de la parte inferior de R_3 . Corte 9 . . X 22, N// .



FOTOGRAFIA N° 11 (Microfotografía n° MP/4-B).- Cicatriz erosiva o huella de carga en la base de una delgada laminación arenosa. Misma muestra y localidad que la fotografía anterior. X 22, N//.



FOTOGRAFIA N° 12 (Microfotografía n° MP/6-A).- Pizarra con laminaciones arenosas de la parte inferior de R_2 . Observéense la estratificación S_0 , la esquistosidad principal S_1 y la crenulación de F_3 que solo afecta a la capa más pelítica. Corte 9 . X22, N//.

En ninguno de los muchos afloramientos visitados de esta Formación se han encontrado características litológicas adecuadas, por lo que se desechó como potencialmente explotable al final de la Fase de Exploración.

2.3.3. Formación R₃.

Descrita en la bibliografía como una alternancia de areniscas y pizarras, en realidad es fundamentalmente pizarrosa (excepto su parte más alta, donde predominan las areniscas). Pero la litología predominante es la de pizarras con laminaciones arenosas centimétricas frecuentes que, por su proximidad unas a otras, impedirían el aprovechamiento de la mayoría de la roca (Fotografía nº 12). Además en muchos casos, la pizarra también tiene textura heterogénea (Fotografía nº 13), por lo que su fisilidad es muy baja.

Únicamente, cerca de la base de la Formación, en el centro del Sinclinal de Majaelayo se han encontrado unas capas de pizarra de grano medio que han sido allí explotadas de forma artesanal (Plano nº 5). De ellas se tomaron las muestras 399/85-459-GU-PM/3 y 399/85-459-GU-PM/8, que tienen un tamaño de grano medio y fisilidad mediana a mala. Se han desechado también por su poco espesor, de algunos metros, solamente.

Por tanto, esta R₃ fué descartada también como unidad potencialmente productiva.

2.3.4. Formación R₄.

Es la única unidad con características litológicas adecuadas para su explotación.

Se trata de unas pizarras de color gris oscuro, tamaño de grano de medio a muy fino, cantidad de pirita variable, con textura por lo general homogénea y buena fisilidad allí donde las condiciones estructurales lo permiten.

De las dos áreas donde aflora esta unidad (Area de Riaza en los planos nº 2,3 y 4 y Area de Atienza, plano nº 11), en la primera



FOTOGRAFIA Nº 13 (Microfotografía nº LB/169-A).- Pizarra limolítica con laminaciones arenosas de la parte inferior de R₃. Observéanse los porfiroblastos de clorita pre-esquistosos y la heterogeneidad textural de la roca. Arroyo de Valdecanal, al S. del Molino del Bornova. Corte . 10. X22, N//.

se comprobó que la esquistosidad principal (la que forma los planos de fisilidad de la roca) es de tercera fase hercínica, tipo espaciada de crenulación, por lo que la fisilidad de la pizarra es muy baja y los planos muy irregulares. Por tanto, se consideró como unidad potencialmente explotable solamente en el Area de Atienza, cartografiándose allí a escala 1:25.000 (veáse el plano nº 1), marcando sus afloramientos como zona de Interés Prioritario (veáse el plano nº 13).

2.4. TECTONICA Y METAMORFISMO

2.4.1. Tectónica prehercínica

La zona de estudio tiene una compleja historia geológica, en la que se encuentran restos de al menos tres etapas deformativas: prehercínica, hercínica y alpina. Muy resumidamente, y basándonos fundamentalmente en, GONZALEZ LODEIRO (1981 a, 1981 b), puede sintetizarse como sigue.

Existe una discordancia en los materiales infraordovícicos, detectable a nivel cartográfico, que se ha atribuido a movimientos asínticos no acompañados de metamorfismo ni deformación lo suficientemente importantes como para generar esquistosidad. Asimismo, la discordancia existente entre la base del Ordovícico y su sustrato, también detectable únicamente por cartografía, atribuida a la fase Sárdica.

2.4.2. Fases hercínicas

La orogenia Hercínica, mucho mejor estudiada, es la responsable de las estructuras visibles actualmente en los afloramientos paleozoicos. Se han distinguido en ella tres fases principales de deformación intensa y varias otras posteriores, de menor intensidad pero de gran importancia cartográfica también. Son éstas las siguientes:

* Primera fase, F₁. Produce esquistosidad continua en las pizarras, muy penetrativa, con reordenación total de los minerales de la roca, de forma tal que en general forma los planos de fisilidad más conspicuos de las rocas (Fotografía nº 14). Es la responsable de las macroestructuras más notables, es decir, de los pliegues desde la escala de afloramiento hasta los de algunos centenares de metros de longitud de onda. Es también responsable de algunas macroestructuras (longitud de onda de varios kilómetros o decenas de kilómetros), como el Sinclinal de Riba de Santiuste, el anticlinorio de Hiendelaena y el anticlinorio de El Cardoso-Riaza; el Sinclinal de Majaelrayo, también atribuido a la primera fase por algunos autores, no fué, en nuestra opinión, originado durante la F₁, sino durante las fases posteriores, ya que, como puede verse en el corte 3 (Plano nº 4), en realidad se trata de un gran flanco de pliegue de F₁ suavemente curvado posteriormente; parece, además, que la esquistosidad de F₃ está también plegada.

En este segmento de la Cadena Hercínica es vergente al E., excepto en aquellas zonas donde fases posteriores la han volcado, como en la comarca de Atienza, donde se dispone retrovergente al S0.



FOTOGRAFIA N° 14.- Esquistosidad de primera fase, S_1 , subvertical, en pizarras de R_3 . Al N. de Majaelayo (Guadalajara). Corte . 4.



FOTOGRAFIA N° 15 (Microfotografía n° VP/114-B).- Esquistosidad S_1 intensamente crenulada por S_2 , que es la esquistosidad principal, con bandeo tectónico incipiente. X22, N//.

* Segunda fase, F₂. Originó grandes cabalgamientos en una etapa ligeramente posterior a F₁, apilando unidades litológicas e incluso zonas paleogeográficas alejadas unas sobre otras, lo que indudablemente condujo a un engrosamiento cortical importante durante la orogenia. Sus efectos solo se manifiestan cerca de las superficies de cabalgamiento, donde esquistosidades de crenulación, pliegues en vaina, en chevron, etc... las acompañan hasta una distancia de algunos centenares de metros de ellas. En la Fotografía nº 15), puede observarse el aspecto microscópico de la esquistosidad de crenulación de F₂(S₂).

En la zona abarcada por este estudio solamente se han encontrado estructuras de F₂ en la parte occidental (Plano nº 2), donde su vergencia es también al E, similar a las de F₁.

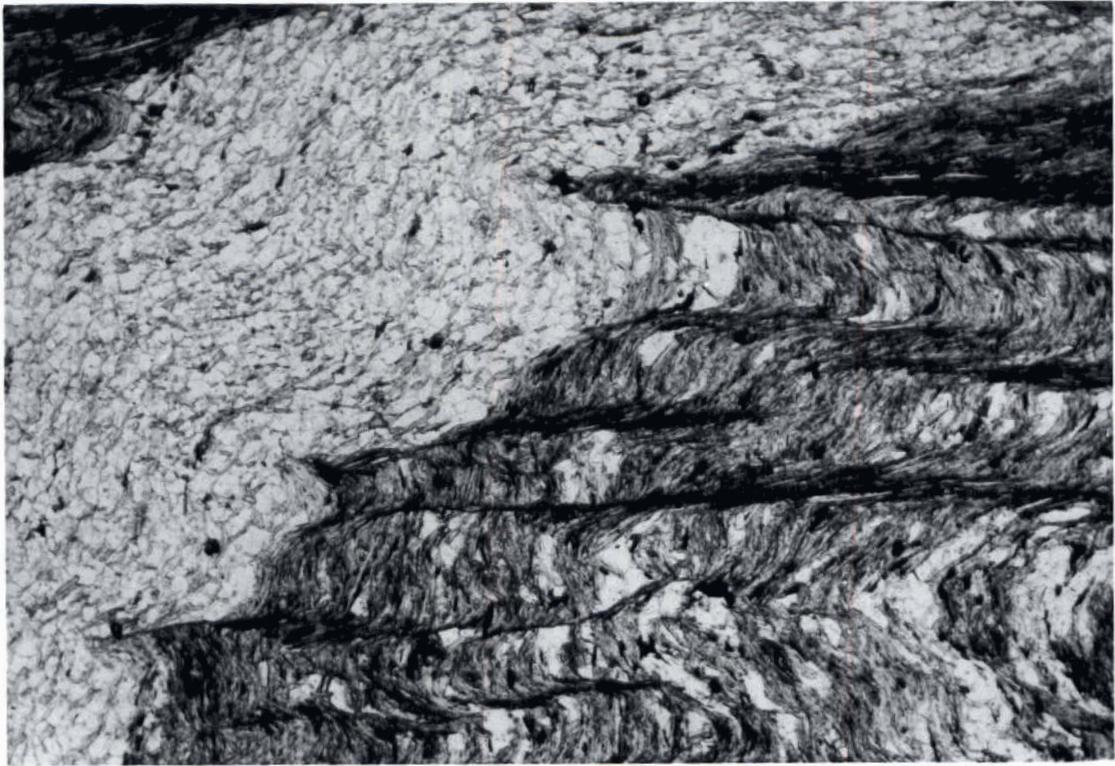
* Tercera fase, F₃. Es una fase de deformación retrovergente con respecto a las dos anteriores, ya que su vergencia es hacia el SO. Normalmente se manifiesta por una esquistosidad espaciada de crenulación (Fotografía nº 16), a veces acompañada de bandedo tectónico (Fotografía nº 17), que se desarrolló especialmente bien en las capas pelíticas (Fotografía nº 18). En algunos lugares su intensidad es tal que constituye la esquistosidad principal, llegando a obliterar a la S₁, que solo se puede observar al microscopio.

Es responsable de algunas mesoestructuras (Fotografía nº 19) y macroestructuras como el apretado sinclinal que se localiza al O. de Pradena de Atienza, cuya traza axial fue situada en el corte 8 (Plano nº 9); tiene mucha importancia en este estudio, ya que, aparte de inutilizar grandes masas de pizarra para su uso ornamental por la crenulación, condiciona fuertemente la estructura en la zona de Interés Potencial, como se verá más adelante.

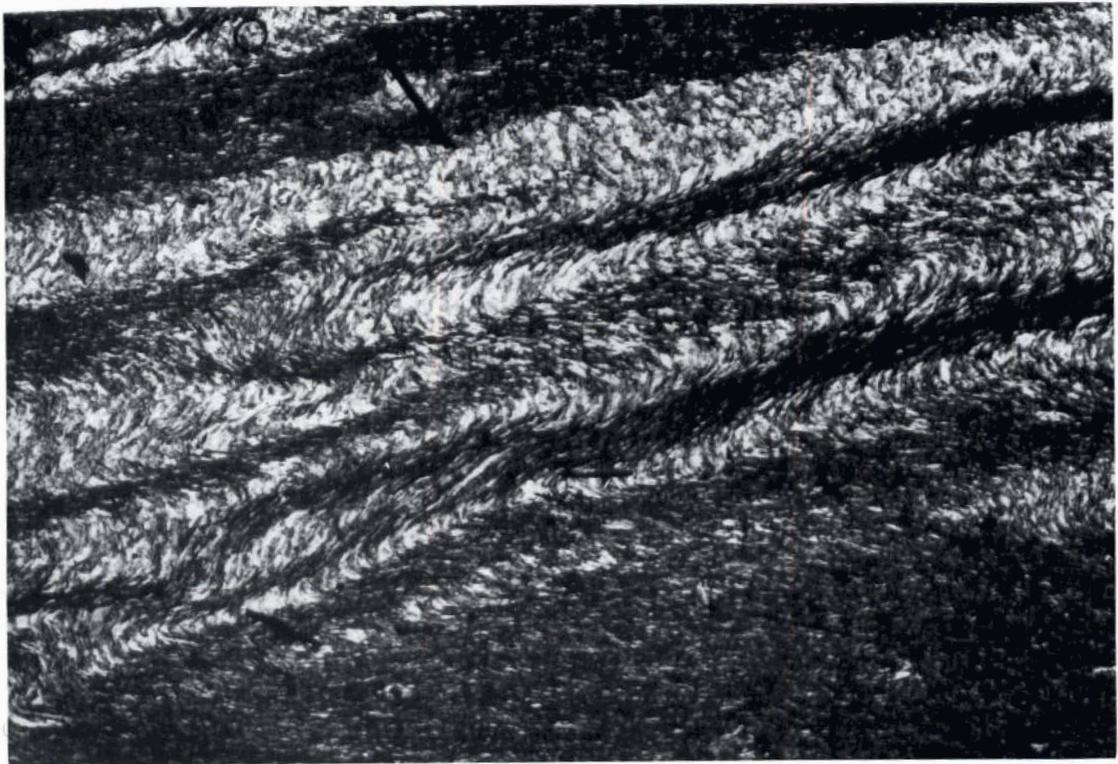
Posteriormente a estas tres fases, admitidas en todo el Macizo Hespérico por la mayor parte de los autores, han existido otras deformaciones, todavía mal estudiadas y sobre las que no existe unanimidad de criterios ni de nomenclatura; JULIVERT et al., (1977), PEREZ-ESTAUN., 1978; MARTINEZ CATALAN, 1985, y muchos otros autores citan diversas fases deformadoras tardías. Nosotros hemos encontrado en la zona de estudio evidencias de al menos dos de estas fases, que hemos llamado F₄ y F₅ y que describimos a continuación.

* Cuarta fase, F₄. Parece corresponderse con la "tercera fase" de GONZALEZ LODEIRO (1981 b). Se manifiesta solo localmente, como una crenulación, a veces tan intensa que produce una verdadera esquistosidad espaciada (Fotografía nº 20) que crenula a las anteriores (S₁ y S₃). Es retrovergente con respecto a S₁, buzando al N ó NE de 40º a subvertical. En campo puede confundirse con la S₃, que también es de crenulación, pero su dirección de buzamiento, más norteada y su ángulo de buzamiento, en general mayor que el de S₃, permiten distinguirlas; además, en muchos lugares aparecen juntas ambas, observándose como S₄ crenula a S₃.

Se han localizado pliegues de esta fase en el Alto de Los Lomos, en el borde N de la zona de Bornova-Rodada (Plano nº 13), con plano axial de orientación 20/70 (Fotografía nº 21). De hecho, la mitad septentrional de dicha zona se ha descartado como posiblemente explotable debido a la presencia de una intensa S₄.



FOTOGRAFIA N° 16 (Microfotografía n° LB/144-A).- Esquistosidad de F_3 crenulando a la S_1 . Obsérvese que en la capa cuarzosa la S_3 se desarrolló muy débilmente. S_0 y S_1 buzando al O. S_3 buzando al E. Al SE. de Los Condemios (Guadalajara). Corte 8. X22, N//.



FOTOGRAFIA N° 17 (Microfotografía n° LB/145-A). Esquistosidad S_3 acompañada de bandeo tectónico en los flancos cortos y charnelas de pliegue de F_3 , en pizarras de R_2 . Obsérvese la aguja de ilmenita con sombra de presión. Arroyo de Pelagallinas. Corte 8. X22, N//.



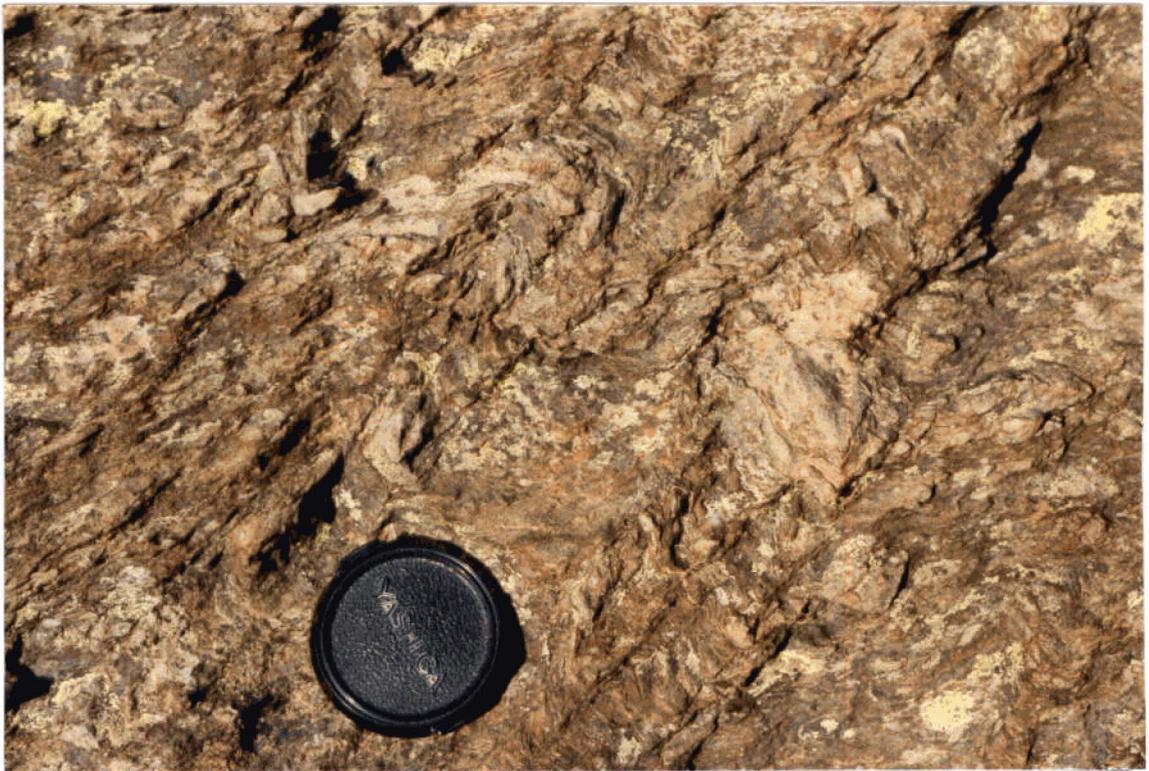
FOTOGRAFIA N° 18 (Microfotografía n° MP/10-A).- Estratificación microplegada (S_1 plano axial) y S_3 con bandeado tectónico en las capas pelíticas de las pizarras con laminaciones del techo de R_2 . Corte 9. X22 , N //.



FOTOGRAFIA N° 19.- Pliegue de plano axial poco inclinado, probablemente de F_3 , en los tramos cuarcíticos superiores de R_3 . Al NE. de El Muyo (Segovia). Corte 2, NE. a la derecha.



FOTOGRAFIA N° 20 (Microfotografía n° LB/154-A).- Esquistosidad S_1 microplegada por F_3 (bandeado tectónico) y ambas a su vez afectadas por la esquistosidad de crenulación S_4 , quien buza al NE más que S_3 . Pizarra de R_4 en las canteras del Bornova, Zona Bornova-Rodada. X22, N//.



FOTOGRAFIA N° 21.- Pliegues de F_4 en las pizarras con laminaciones de R_3 . Ladera S. del Alto de Los Lomos, zona Bornova-Rodada, N, a la izquierda.

* Quinta fase, F₅. Esta fase, subvertical y aproximadamente perpendicular a las estructuras de F₁, podría corresponder con la "Fase Radial" de MARCOS, 1972; PEREZ-ESTAUN, 1978 y la "cuarta fase" de GIL TOJA et al., 1985, de otras zonas del Macizo Hespérico. Aparece en el campo como un intenso diaclasado, a veces acompañado de kink-bands y crenulación subvertical, con direcciones que van de N40E a N65E. Tiene una gran importancia como factor limitante de la explotabilidad de los macizos rocosos, como se verá en el apartado 4.3.

Además de estas deformaciones en la comarca de Atienza, se encuentran a veces esquistosidades tardías de orientación N-S y buzamiento al W que no han sido interpretadas, ya que ello escapa de los objetivos del presente proyecto, y numerosos diques de cuarzo centimétricos, a veces mineralizados de orientación próxima a 45/30 (el buzamiento puede variar de 20 a 45°), que van acompañados a ambos lados de bandas de deformación (Fotografía nº 22); parece que producen un pequeño salto, con juego de falla inversa, y podrían estar relacionados con microfracturas inversas detectadas en las láminas delgadas (veáse el apartado 4.3.3). La figura 2 es un croquis de una de ellas en el Molino de Lucientes (WL 0145.6067); se observa que afecta a la Sp=S₁ y a la esquistosidad de crenulación Sc=S₃ ó S₄.

Aunque no sabemos si estas pequeñas fallas son hercínicas o alpinas, se han incluido en el presente apartado y no en el siguiente por la importancia que tienen de cara a la explotabilidad de las pizarras.

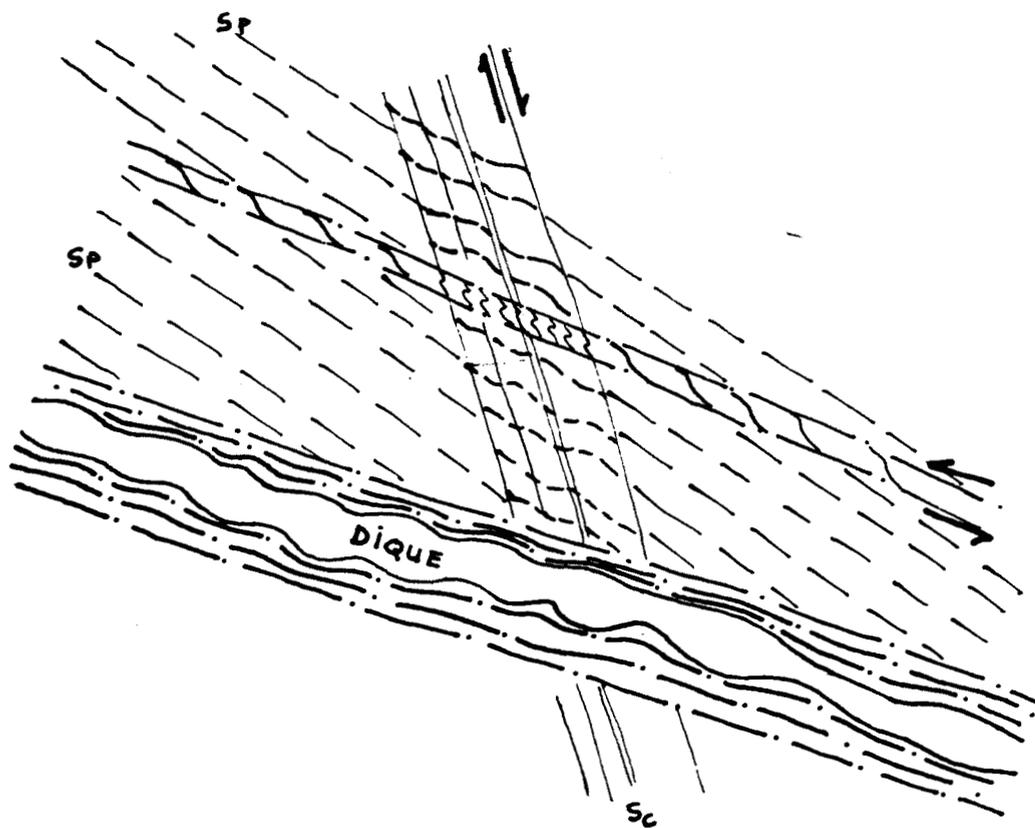
2.4.3. Fracturación tardihercínica y deformaciones posteriores

Las únicas referencias bibliográficas sobre la fracturación en la zona del estudio corresponden a GONZALEZ LODEIRO, 1981 y VICENTE & UBANEL, 1983, además de lo aportado por la cartografía MAGNA. Todos ellos coinciden en señalar la importancia de la fracturación tardihercínica, que rejugó posteriormente durante el Ciclo Alpino.

Los principales sistemas de fallas son los de dirección NE-SO, que parece ser han sufrido al menos tres fases de deformación, dos de ellas con una importante componente horizontal del desplazamiento y la tercera con componente vertical principal normal. Estas fallas son verticales o tienen buzamientos elevados.



FOTOGRAFIA Nº 22.- Pequeña fractura, rellena de cuarzo, acompañada de bandas de deformación y con aparente juego de falla inversa, afectando a pizarras de R₄. Molino del Bornova, Zona Bornova-Rodada, NE, a la izquierda.



Sp=S₁ -- 65/25

Sc -- 22/35

Dique -- 45/20

Las flechas indican sentido de la rotación.

CROQUIS DE DIQUE DE CUARZO ASOCIADO A BANDAS DE DEFORMACION (Escala aproximada 1/2. E. a la derecha)

Otros sistemas importantes de fracturas son los NNO-SSE, también de componente horizontal principal, sinestros casi siempre y con desplazamientos que llegan a los 7 Km. (Falla de Cañamanes, GONZALEZ LODEIRO, 1981).

Estos sistemas de fallas han actuado en diversas etapas desde el Pérmico, condicionando la sedimentación de los materiales pérmicos y mesozoicos, pudiendo haber jugado en épocas muy recientes (Plioceno-Cuaternario) y haber dado lugar a cuencas de sedimentación continentales recientes tipo pull-apart (OLMO SANZ, comunicación personal).

Es obvio que, las fallas han afectado a las formaciones pizarrosas ordovícicas, produciendo su dislocación de forma que cerca de ellas son inexplotables. Además, sus direcciones principales son también las que se han encontrado en fracturas menores, diaclasas, kink-bands y crenulaciones tardías, como se verá en el apartado 4.3.

2.4.4. Metamorfismo

La región estudiada fué afectada por el metamorfismo hercínico, no existiendo indicios de otras fases metamórficas anteriores o posteriores (a pesar de lo expuesto por APARICIO & GALAN, 1980, quienes creen que el Carbonífero poshercínico de Tamajón y Valdesotos ha sido afectado por un metamorfismo de muy bajo grado).

El carácter del metamorfismo hercínico ha sido objeto de polémica, siendo para algunos autores del tipo "barrowiense" y para otros del tipo "intermedio de baja presión".

Toda la zona por nosotros estudiada se encuentra dentro del grado bajo o muy bajo, excepto el extremo noroccidental del sinclinal de Majaelrayo, en la comarca de Riaza (Corte 1, Plano nº 1). Allí aparece (muestra 399/85-432-SG-VP/114) granate (Fotografía nº 23) en las pizarras de R₂, lo que constituye el límite con el grado medio.

En ambos flancos del Sinclinal de Majaelrayo aparece blastesis metamórfica, visible en el campo, en las pizarras de R₁ y R₂ (Cortes nº 3,4 y 6), cosa que no ocurre en el centro del Sinclinal ni más hacia el E, en la comarca de Atienza. Nuestra interpretación de este hecho



FOTOGRAFIA N° 23 (Microfotografía VP/114-B).-
Porfiroblastos de granate de 0,5 mm de longi-
tud aproximada, parcialmente alterado, cuya -
relación con las esquistosidades presentes S_1
y S_2 indican que es pos- F_1 y pre- F_2 . Misma -
muestra y localidad que en la fotografía n° 15.

es que se trata de una isograda plegada en forma sinclinal, de forma que, puesto que la blastesis es pos- F_1 , el Sinclinal de Majaelayo no sería una estructura de 1ª fase, sino que correspondería a una fase posterior, como ya apuntamos en el apartado 2.4.2.

Respecto a la existencia de rocas con grado metamórfico muy bajo (anquimetamórficas), APARICIO & GALAN (op.cit.), citan la existencia de algunos terrenos devónicos, no estudiados por nosotros, con este grado, correspondiendo todos los ordovícicos al grado bajo.

El grado metamórfico tiene una gran importancia en relación con la calidad litológica de la pizarra como roca ornamental; por ejemplo, las pizarras con blastesis metamórfica visible del Sinclinal de Majaelayo son inexplotables por su heterogeneidad textural, debido a la presencia de porfiroblastos que deforman la esquistosidad de primera fase.

Del estudio microscópico de las muestras tomadas en el trabajo, la mayoría de ellas de pizarra, pueden obtenerse una serie de conclusiones sobre la blastesis metamórfica en relación con las fases de deformación:

- * Los minerales pre- F_1 que se han conservado (detriticos o diagenéticos) más frecuentemente son cuarzo, illita-moscovita, clorita, opacos (especialmente ilmenita), plagioclasa y minerales detriticos pesados (circón, turmalina).

- * Los minerales sin- F_1 son clorita, cuarzo, mica blanca, biotita (muy escasa) y algunos cloritoides e ilmenitas.

- * Los minerales pos- F_1 y pre- F_2 son cloritoides y granate.

- * Los unicos minerales sin- F_2 que hemos encontrado son los opacos que forman los planos de esquistosidad S_2 .

- * Lo mismo puede decirse de F_3 .

- * Posteriormente a F_3 parecen existir algunos opacos, posiblemente pirrotina o marcasita, que fosilizan texturas de F_3 .

De todo lo anterior se desprende que el metamorfismo se desarrolló sobre todo de sin- F_1 a pre- F_2 . Más hacia el O de nuestra zona se ha citado otra fase metamórfica importante, sin- F_2 (ARENAS et al., 1980).

3. FASE DE EXPLORACION

3.1. CORTES GEOLOGICOS E. 1:25.000

3.1.1. Corte 1. RIOFRIO-BECERRIL. (Plano nº 2).

Se situa dentro de la hoja de Riaza (432) del M.T.N., al E de esta localidad. Tiene una longitud de unos 10 Km., entre el cerro Cantillares (1.361 m) al O. y el cerro Pizarral (1.399 m) al E.; el recorrido es totalmente a pie, por senderos o campo a través, excepto un tramo de carretera local que rodea a la Ermita de Hontanares (VL 6350.7070). Se accede al corte por la carretera local de Riaza a Santibañez de Ayllón, desviándose en el Km 3 hacia la referida ermita.

La columna litológica levantada (Plano nº 12) incluye todas las formaciones del Grupo Rodada, así como las infrayacentes Formación Alto Rey y Formación Constante y, a techo del Grupo, en contacto mecánico, la Formación Cañamares:

Debuta el Grupo Rodada con la Formación Rodada 1, constituida por 100 m, aproximadamente, de alternancias de pizarras, pizarras con laminaciones arenosas, areniscas y cuarcitas en bancos decimétricos. Estos materiales de fuerte tendencia arenosa hacia la base, van haciéndose más pelíticos hacia el techo sin que lleguen a desaparecer los tramos areniscosos.

Es esa desaparición la que marca el tránsito a los materiales de la Formación Rodada 2, compuesta por aproximadamente 600 m de pizarras grises y negras bastante homogéneas de grano medio a grueso; son abundantes las acumulaciones de óxidos de hierro sobre los planos de esquistosidad principal, cubriéndoles de una pátina rojiza característica; se observan, en tramos, huecos o moldes de metálicos de Fe, parcial o totalmente alterados, de dimensiones inferiores a 4 mm. No están ausentes delgadas laminaciones arenosas que se presentan de un modo muy disperso, siendo más abundantes hacia la base y más aún hacia el techo.

La aparición de lentejones francamente arenosos y el perceptible aumento de las laminaciones arenosas, señalan el límite inferior de la Formación Rodada 3 que aparece constituida por aproximadamente 525 m. de alternancias de pizarras, pizarras arenosas, limolitas e intercalaciones decimétricas de areniscas y cuarcitas. Estas dos últimas litologías son más abundantes a techo, observándose bioturbación y laminaciones cruzadas.

Suprayacente a la formación anterior, se presenta la Formación Rodada 4, compuesta por aproximadamente 100 m de pizarras negras homogéneas de grano medio-fino. Son poco abundantes los óxidos de Fe. Hacia el techo incluyen cantos de caliza arenosa o arenisca (con cemento carbonático. Ver ficha petrográfica 399/85-432-SG-VP/115). Las dimensiones de estos cantos o huecos de cantos disueltos son generalmente, de milimétricas a escasamente centimétricas, observándose, no obstante, algún fragmento de hasta 1.5 m en su eje mayor (Fotografía nº 6, página 16).

Por encima, aflora la Formación Rodada 5, constituida por aproximadamente 100 m de pizarras grises y ocres, de grano medio-grueso, con frecuentes laminaciones arenosas y abundantes intercalaciones de areniscas y cuarcitas de potencia centimétrica a decimétrica, donde se observan laminaciones cruzadas y bioturbación. Los materiales de esta formación incluyen cantos de caliza o huecos de cantos disueltos, que son más abundantes en los tramos medios y basales.

Desde el punto de vista estructural, el corte se localiza en la parte septentrional del Sinclinal de Majaelayo (véase el plano nº 1). La mesoestructura obtenida corresponde a un gran flanco normal, de F_1 , replegado por la F_3 , lo que produjo incluso morfología con gancho en algunos pliegues menores y retrovergencia de las superficies axiales de F_1 .

Las estructuras menores más conspicuas son las tres esquistosidades que se desarrollaron como consecuencia de las tres primeras fases hercínicas. La S_1 , del tipo pizarrosidad (Slaty cleavage) en los materiales pelíticos, de orientación variable entre 90/90 y 270/40, debido a los efectos de fases posteriores. En la parte occidental del corte se manifiesta una S_2 espaciada, del tipo esquistosidad grosera y orientación próxima a 270/70. Sobre ambas esquistosidades se desarrolló una S_3 , del tipo esquistosidad grosera espaciada, con orientaciones variables de 0 a E., pero siempre con valores inferiores a 60°, generalmente en torno a los 30°. Tanto la S_2 como la S_3 llevan asociadas, por zonas, un nitido bandeado tectónico.

Los pliegues menores observados se atribuyen a la F_1 , presentando su eje inmersión al N.

Los Kink-bands son subverticales, con dirección NE-SO.

Las fracturas son de dos sistemas: uno de fallas de rumbo y salto dextro, con orientación NE-SO, y otro de fallas normales de bloque hundido al E y orientación NNO-SSO.

Desde el punto de vista exclusivamente litológico, las pizarras de la Formación Rodada 4 presentan características favorables para considerarlas como potencialmente explotables, no ocurriendo así con las Formaciones Rodada 1, Rodada 2, Rodada 3 y Rodada 5: numerosas laminaciones arenosas e intercalaciones cuarcíticas (Rodada 1,3 y 5), excesivo tamaño de grano de los niveles más pizarrosos (Rodada 1,2,3 y 5), abundancia en óxidos de Fe (Rodada 2).

Los rasgos tectónicos con la manifestación de tres esquistosidades, asociadas a tres fases deformativas, inciden negativamente en la calidad de las pizarras de todo el Grupo Rodada aflorante en este corte: fuerte lineación de crenulación, mediocre fisibilidad, etc.

3.1.2. Corte 2. EL MUYO-SANTIBAÑEZ. (Plano nº 3).

Se situa este corte en la Hoja de Riaza (432) del M.T.N., entre las poblaciones de El Muyo (VL 7350.7150) y Santibañez de Ayllón (borde S. de la Hoja 404-Ayllón). Tiene una longitud aproximada de 8,5 Km., y su recorrido se realiza campo a través y por la pista que une las cercanías de Santibañez de Ayllón con el cerro de La Torrecilla (1.669 m). Se accede a su itinerario, bien desde las proximidades de El Muyo, bien por la mencionada pista cuyo empalme se situa en el Km. 121 de la carretera C-114.

Se atraviesan, de techo a muro, la Formación Santibañez y la mitad superior del Grupo Rodada, es decir, las Formaciones Rodada 5, Rodada 4 y gran parte de Rodada 3.

La Formación Santibañez está constituida por unos 40 m. de cuarcitas masivas blancas y ocres, estratificadas en bancos de 2-5 m. Tienen algunas delgadas intercalaciones pelíticas. Se observan ripples y laminaciones cruzadas.

Subyacente a la anterior, aflora la Formación Rodada 5 compuesta por aproximadamente 90 m de pizarras grises y ocreverdosas, de grano grueso, con laminaciones arenosas y algún lentejón arenoso decimétrico; se aprecian laminaciones cruzadas. En todos los tramos de esta formación se incluyen cantos de caliza, o huecos de cantos de caliza disueltos, de hasta 3 cm de tamaño. Hacia la mitad de la formación aparece un nivel de pizarras, de unos 8 m de potencia, de grano medio, sin laminaciones ni intercalaciones arenosas.

Inmediatamente por debajo afloran los materiales de la Formación Rodada 4, constituida por 125 m, aproximadamente, de pizarras negras homogéneas, de grano medio. Incluyen a techo cantos de caliza, o huecos de cantos de caliza disueltos, de milimétricos a escasamente centimétricos. En los tramos basales estas pizarras adquieren un cierto carácter ampelítico (ver ficha petrográfica 399/85-432-SG-VP/123).

La Formación Rodada 3 se ofrece como una alternancia de pizarras, pizarras con laminaciones arenosas, limolitas, areniscas y cuarcitas. Las dos últimas litologías, marcadamente silíceas, son más abundantes y potentes en el tercio superior de la formación, donde proliferan las laminaciones cruzadas, bioturbaciones intensas y, a muro de algunos bancos, huellas de carga. En el cauce del Arroyo de la Hoz, y sobre los dos márgenes, aflora un nivel pizarroso de grano medio con pocas laminaciones arenosas y algunos óxidos de Fe concentrados en los planos de esquistosidad principal; su potencia alcanza los 15-20 m. El espesor de esta formación es difícil de evaluar, ya que no es posible observar el muro de la misma. Puede estimarse su potencia visible en 400 m. Por extrapolación, según los criterios obtenidos en el corte anterior, es probable que su espesor total no rebase los 575 m.

Se localiza este corte en el borde norte del flanco oriental del Sinclinorio de Campillo-Majaelrayo.

La macroestructura más significativa es un pliegue anticlinal cuya zona de charnela se detecta en la ladera norte del cerro de La Torre-ci-lla; pliegues de entidad menor afectan a sus dos flancos. Los planos axiales de estas estructuras tienen dirección NNO-SSE a N-S, con inmersión al N, y vergencia al O. (retrovergentes respecto a la primera fase hercínica). La asimilación de estos pliegues a una de las dos fases mencionadas, F_1 y F_3 , es problemática y parecen ser, más bien, la resultante de la sumatoria de ambas: una génesis inicial sinfase 1 y posterior reorientación y reaplastamiento por la fase 3 con solapamiento de charnelas.

Dentro de las mesoestructuras, se observan, en la zona occidental del corte (unos 750 m al E del Arroyo de la Hoz) y sobre los tramos más cuarcíticos, pequeños pliegues de orden métrico de plano axial de subhorizontal a fuertemente vergente al O. Parece muy probable su relación con la tercera fase (Fotografía nº 19).

Dentro del ámbito de las microestructuras hercínicas se han detectado dos esquistosidades (ver fichas petrográficas nº 399/85-432-SG-VP/117 a VP/123): una, correspondiente a la primera fase de deformación, S_1 , es de tipo slaty cleavage en los materiales pelíticos y "rough cleavage" en los de componente silíceo más acusada, tiene rumbo N-S y buzamiento muy variable por efecto de la esquistosidad secundaria observada; ésta, que se manifiesta como una esquistosidad de crenulación tipo rough cleavage, está asociada a la tercera fase de deformación, S_3 , desarrolla, en zonas, bandeado tectónico y su orientación es NO-SE con buzamiento 20°-55° al NE.

A lo largo de todo el corte es frecuente, y en zonas restringidas intensa, la aparición de un sistema de Kink-bands subverticales y de dirección NE-SO.

A pesar de que, según sus rasgos litológicos, tanto la Formación Rodada 4 como los niveles pizarrosos de grano medio mencionados dentro de Rodada 5 y Rodada 3 presentan características favorables, la existencia de una marcada esquistosidad secundaria, S_3 , reduce sensiblemente las posibilidades de su explotación industrial como pizarras para techar. Si bien es cierto que podrían existir bandas "resguardadas" de la acción de la S_3 , su presencia bastante generalizada nos induce a pensar que, en principio, este área no aparece como especialmente favorable.

3.1.3. Corte 3. Pto. de la QUESERA-CANTALOJAS. (Plano nº 4).

Este corte se realizó entre el Collado de la Quesera (Cota 1710, VL 7490.6305) y la localidad de Cantalojas (VL 7945.6500), situada unos 13 Km. al E; está todo él en la hoja de Riaza (432) del M.T.N. Al Puerto de la Quesera se accede por la pista de Riofrío de Riaza a Majaelayo, asfaltada entre el puerto y la primera localidad. La parte

occidental del corte, desde el Collado de La Quesera hasta más allá del collado de Las Lagunas se realizó a pie monte a través. El resto del corte se realizó en la pista que desde Cantalojas vá al Hayedo de la Tejera Negra. A Cantalojas se accede por la carretera local que desde la C-114 va a Villacadima, Cantalojas y Galve de Sorbe.

Se han cortado las siguientes formaciones: Constante (parte superior), Alto Rey, R_1 , R_2 , R_3 y R_4 (parte inferior). Se describen solamente las que tienen interés para el proyecto, esto es, R_2 , R_3 y R_4 .

La Formación R_2 debuta con unas capas de pizarra gris, de grano medio-fino, pocos metálicos y escasas laminaciones arenosas. Estas capas tienen poco espesor (unos decenas de metros), estando sobre ellas las típicas pizarras negras con pirita que hacia el Oeste (Collado de Las Lagunas tienen blastesis metamórfica de cloritoide visible; muestra 399/85-432-GU-LB/125), pizarra dura con mala fisilidad. Estas capas, inexplotables, constituyen la mayor parte de la formación (veáanse las muestras correspondientes a este corte en el Anexo 2). Hacia el techo, aparecen algunas laminaciones arenosas, con la estratificación intensamente bioturbada; ello constituye el tránsito con la formación R_3 , suprayacente. El espesor de R_2 es difícil de calcular, pero debe ser cercano a los 400 m.

El muro de R_3 se considera en la base del primer tramo en que las laminaciones arenosas superan el 25% de la roca. Toda la parte inferior de R_3 practicamente está constituida por pizarras con abundantes laminaciones arenosas, muy bioturbadas, de milimétricas a centimétricas. Pueden intercalarse capas métricas de pizarra gris oscuro de grano grueso a medio, sin pirita y escasas laminaciones. A techo de esta formación aparece un paquete de areniscas, de espesor métrico, con pelitas intercaladas en forma de lentes (estratificación flaser) y estratificación ondulada. El espesor aparente de la R_3 es de unos 500 m.

Inmediatamente encima se localizan los bancos inferiores de R_4 , constituidas por pizarras grises, con cantidades variables de pirita y grano medio a fino. El espesor visible es de unos 150 m (no se corta el techo de esta unidad).

Estructuralmente, el corte se situa en la mitad occidental del Sinclinal de Majaelayo; en él, se observa como la envolvente de la estratificación buza menos de 20° hacia el E, entrando practicamente horizontal en el centro del mismo. Se observa también como la S_3 pasa de buzar 60° al E. en la parte occidental a menos de 10° en el centro. Todo ello se explicaría si el sinclinal fuera una estructura producida por una o más fases tardías, posteriores a F_3 .

Los pliegues de primera fase que se han detectado varían en su morfología según la litología en que se desarrollen. Son más paralelos y con un ángulo entre flancos menor en las cuarcitas de las formaciones Alto Rey y R_1 , mientras que en R_2 , R_3 y sobre todo R_4 parecen mucho más laxos. En R_3 , con la superficie axial muy verticalizada, el flanco

occidental de los sinclinales buza de 40 a 70° al E, mientras que el flanco oriental se dispone vertical o ligeramente invertido. La longitud de onda de estos mesopliegues varía de unos 60-150 m., en R₂ a unos 400-500 m. en R₃ y R₄.

Las estructuras menores más frecuentes son las esquistosidades de primera y tercera fase. S₁ aparece, como es habitual, como una pizarrosidad continua, a veces casi borrada por S₃. En la parte oriental del corte, la esquistosidad principal es la S₃, de crenulación, con un espaciado medio de 0,15 mm.

Se han observado también Kink-bands 330/70, muy frecuentes, y cierta crenulación, y espaciada, subhorizontal. Las fallas son todas de pequeña entidad, excepto la que pasa al O. de Cantalojas y constituye el límite oriental de los afloramientos paleozoicos. Se han medido fallas normales de orientación 70/50, con una crenulación muy grosera asociada a su plano, y numerosas diaclasas de varios sistemas.

Desde un punto de vista estrictamente litológico, tanto la parte inferior de R₂ (inmediatamente encima de R₁) como R₄ son unidades potencialmente explotables; sin embargo, la intensa fracturación (que a veces llega a una densidad de más de 10 diaclasas/m.). Los Kink-bands, la crenulación de S₃ y en el caso de las capas de R₂, el poco espesor de la unidad hacen que la zona explorada no pueda considerarse prometedora.

3.1.4. Corte 4. Rio JARAMILLA-Pico OCEJON. (Plano nº 5).

El corte está localizado en la hoja de Tamajón (459) del M.T.N., excepto un pequeño segmento que está en la hoja 432, situada inmediatamente al N. Tiene una longitud de unos 11 Km., habiendo sido realizado por la pista de Riaza a Majaelrayo, en el tramo situado entre esta localidad y el río Jaramilla.

Al E de Majaelrayo (VL 7465.5155) un camino solo transitable a pie asciende hasta el pico Ocejón (2.084 m). A Majaelrayo puede accederse o bien desde Tamajón, o bien por la referida pista.

Se atraviesan las formaciones siguientes: Alto Rey, R₁, R₂ y R₃ (parte inferior). Como en otros cortes y por abreviar el Informe, solo se describen las formaciones que tienen interés para el proyecto:

La Formación Rodada 2 está compuesta fundamentalmente por pizarras grises homogéneas, en las que a veces aparecen cavidades milimétricas y centimétricas tapizadas por colores rojos o amarillos de oxidación, que posiblemente corresponden a antiguos cantos hoy desaparecidos. Muy aisladamente también aparece algún nivel de ampelitas de hasta 10 m. de espesor.

La superficie de estratificación es muy difícil de observar a escala de afloramiento, ya que faltan niveles de referencia. Únicamente es posible su determinación mediante observaciones panorámicas (Fotografía nº 1, pag. 12).

Su potencia máxima deducida a partir de la cartografía y de los cortes geológicos es de 2.000 m. aproximadamente, aunque esta cifra es excesivamente elevada en comparación con los espesores de esta misma formación en otras regiones, por lo que es previsible pensar en la existencia de pliegues no localizados, que multipliquen su espesor real.

Por encima de la Formación Rodada 2 se coloca concordantemente y mediante paso más o menos gradual, la Formación R₃. Se compone de pizarras grises con niveles y lenticulas y a veces capas centimétricas de arenisca. También se intercalan varias capas de espesores métricos de pizarras grises oscuras de grano fino y fino-medio aptas, en principio, para la explotación.

Su potencia máxima calculada, a partir de la cartografía y los cortes geológicos es aproximadamente de 1.000 m., sin descartar la posibilidad de que sera inferior debido a la presencias de pliegues no localizados en este trabajo.

La estructura principal de esta región es el Sinclinal de Majaelrayo. En realidad corresponde a un Sinclinal complejo en el que en sus flancos se localizan pliegues coherentes con la gran estructura. La geometría de estos pliegues no parece muy apretada. El angulo entre flancos oscila entre 60-90° aproximadamente. Su superficie axial es subvertical y coincide con la esquistosidad principal regional, que es la S₁. Sus ejes son subhorizontales.

La monotonía de las series pizarrosas, hace muy difícil la localización de todos los pliegues, aunque estos sean importantes, por lo que es probable que los representados en el mapa y en los cortes geológicos sean solo una parte de los existentes.

No es frecuente observar mesopliegues en las series pizarrosas. Se han observado asociadas a la Fase 1 en algunos niveles arenosos de R₃.

También muy localmente se han observado en la zona del Ocejón unos pliegues menores pertenecientes a la Fase 3, en los que se reconoce sus características asimétricas y retrovergentes (Fotografía nº 24).

En la mayor parte del corte solo se observa una esquistosidad. Corresponde a una slaty cleavage. Su dirección oscila entre N170E y N10E y su buzamiento es próximo a la vertical. Se trata de la primera esquistosidad. En el flanco oriental del Sinclinal de Majaelrayo en la parte donde aflora R₁, se desarrolla intensamente una esquistosidad de crenulación con buzamiento suave al E y por tanto con caracter retrovergente.

Su correlaciona con la tercera fase de deformación (Fase 3). Su aparición es gradual y su localización se limita a una banda cuyo espesor no debe alcanzar los 0,5 Km. Lleva asociada una importante lineación de crenulación, que cabecea ligeramente al S, la cual aparece prematuramente con respecto a la superficie de esquistosidad.

En el flanco occidental, en la zona donde aflora la Formación Alto Rey y en sus proximidades se localiza una esquistosidad principal buzando 45° al E que hemos supuesto correspondiente a la S₃. En esta misma zona se observa localmente una esquistosidad



FOTOGRAFIA N° 24.- Pliegues menores de F_3 en una muestra de mano de Pizarras con laminaciones de R_1 . Ladera occidental del Pico Ocejón, Corte 4.

de crenulación subvertical, de dirección aproximada N-S. La lineación de crenulación asociada a ella cabecea ligeramente al S.

El sistema más desarrollado de fallas es el de dirección aproximada NE-SO. Son fallas de juego normal y probablemente con una cierta componente de desgarre en la mayoría de los casos dextra. Las diaclasas más importantes son las de dirección NE-SO y subverticales.

La región se encuentra dentro del bajo grado metamórfico. A simple vista se observa frecuentemente la blastesis de cloritoide, la cual ha sido representada en el mapa mediante una sobrecarga.

El núcleo del Sinclinal de Majaelrayo coincide con la zona de menor intensidad metamórfica, pues en ella desaparece la visualización de esta blastesis. Ello podría ser debido, como se ha expuesto ya, a que la correspondiente isograda se encuentra plegada con forma sinclinorial.

Las pizarras de R₂ no presentan características litológicas favorables. Sin embargo, los niveles de color gris oscuro de la base de la Formación R₃ tienen mejor calidad, que queda contrarrestada por su poco espesor. Se han localizado cuatro niveles, tres de ellos de 10 m. o menos de potencia y uno de unos 20 m., pero separados por otros estériles de mucha mayor potencia. Por ello, no se han considerado como de interés, a pesar de que son explotados localmente, de forma artesanal (veáse el apartado 3.2).

3.1.5. Corte 5. Pico SAN CRISTOBAL-TAMAJON. (Plano nº 6).

Se ha realizado el corte dentro de la Hoja de Tamajón (459) del M.T.N. Su extremo occidental se sitúa en los contrafuertes meridionales del cerro de San Cristobal (1.589 m., VI 6865.4510) y el oriental, aproximadamente, 1 Km. al norte de Tamajón (VI 7990.4025). Su itinerario, de unos 25 Kms, se desarrolla por la carretera comarcal de Tamajón a la cerrada del embalse de El Vado y por la pista que, pasando por La Vereda, va desde este embalse a la carretera comarcal El Cardoso de la Sierra-Colmenar de la Sierra.

De base a techo, en serie continua, afloran los siguientes materiales: tramos superiores de la Formación Constante (Tremadoc- Arenig), Formación Alto Rey (Arenig), Formación Rodada 1 (Arenig-Llanvirniense)

y parte de la Formación Rodada 2 (Llanvirniense-Llandeilo). Sobre esta última y por contacto mecánico se sitúan depósitos mesozoicos (arenas, arcillas, margas y calizas). En varios puntos del corte aparecen también depósitos discordantes terciarios (conglomerados, arenas y arcillas).

Los niveles superiores de la Formación Constante atravesados, consisten en unos 100 m. de alternancias de esquistos, pizarras grises arenosas granatíferas, areniscas y cuarcitas, donde son frecuentes las laminaciones paralelas y cruzadas.

Sobre la formación anterior afloran los materiales de la Formación Alto Rey, constituida por, aproximadamente, 100 m. de cuarcitas y ortocuarzitas blancas estratificadas en bancos potentes, 2-7 m. Se observan algunas laminaciones pelíticas delgadas, así como ripples y laminaciones paralelas y cruzadas.

La Formación Rodada 1 está compuesta por 125 m., aproximadamente, de alternancias de pizarras arenosas, areniscas y cuarcitas en bancos decimétricos. Hacia el techo desaparecen los niveles de cuarcita. Son frecuentes las estructuras de bioturbación, laminación paralela y cruzada.

La Formación Rodada 2 debuta con unos niveles de pizarras grises con algún granate y con laminaciones arenosas, de 15-25 m. de potencia, que paulatinamente van perdiendo el carácter arenoso para adoptar el aspecto típico de los materiales de esta formación: pizarras negrogrietas de grano grueso con acumulaciones pardorrojizas de óxidos de hierro sobre los planos de esquistosidad principal. Se detectan algunos huecos dispersos de cubos de pirita así como nódulos de otros metálicos de hierro muy alterados (pirrotina?). En los tramos bajos de esta formación se aprecia blastesis metamórfica visible, puesta de manifiesto por pequeños cristales planares de hasta 2 mm. de cloritoides (véase la muestra 399/85-459-GU-VP/100) y cloritas. No es posible evaluar el espesor de la Formación Rodada 2 en este corte ya que, además de no aflorar el techo de la misma, la dificultad para observar los planos de estratificación dado lo homogéneo de su litología, impide conocer bien la estructura y por lo tanto estimar potencias reales.

Se sitúa este corte en ambos flancos del sinclinorio de Majaelrayo, localizándose el núcleo de esta estructura inmediatamente al N. de la mancha terciaria que bordea por el E. al embalse de El Vado.

Dentro de las estructuras menores hercínicas, se manifiestan dos esquistosidades (veanse las muestras 399/85-459-GU-VP/100 a VP/104). La primera es una esquistosidad de plano axial asociada a la primera fase de deformación, S_1 , de tipo slaty cleavage a slaty cleavage grosero en los materiales más cuarzosos, de dirección mantenida N-S y subvertical. Esta esquistosidad (en el tercio occidental del corte) está crenulada por otra posterior S_3 , del tipo esquistosidad grosera de dirección N-S a NO-SE y buzamiento 30° - 40° al NE. Se aprecia esta esquistosidad secundaria (S_3) sobre los materiales de la Formación Constante y de la Formación Rodada 1, desapareciendo paulatinamente según se avanza dentro de la Formación Rodada 2.

En el flanco occidental del Sinclinal de Majaelrayo se observan, gracias a las capas guías que son tanto la Formación Alto Rey como la Formación Rodada 1, una serie de pliegues menores de orden hectométrico, asociados a la Fase 1, de plano axial paralelo al del sinclinorio y, subvertical, y eje con inmersión suave (5 - 15°) al S. Alguno de los núcleos de estos pliegues aparecen fallados por fracturas con plano subvertical de dirección meridiana y pequeño salto con bloque hundido al O.

En la Formación Rodada 1, se observan pliegues de orden decimétrico de plano axial paralelo a la S_3 y, por lo tanto, presumiblemente relacionados con la fase 3.

Se aprecia en zonas restringidas pero a lo largo de todo el corte un sistema de kink-bands de plano subvertical y dirección NE-SO.

Las características litológicas de los materiales atravesados, no presentan perspectivas favorables para su explotación industrial: profusión de laminaciones e intercalaciones arenosas en las Formaciones Constante y Rodada 1; tamaño grueso del grano de las pizarras de Rodada 2 así como excesiva presencia de concentraciones de óxidos de hierro sobre las mismas.

3.1.6. Corte 6. CERVERA-EL ATAZAR. (Plano nº7).

El trazado de este corte se situa totalmente en la hoja de Valdepeñas de La Sierra (485) del M.T.N. Tiene una longitud de unos 4 Km., entre el punto (VL 5720.3275) situado 2 Km al O. de Cervera de Buitrago y otro (VL 6100.3200) a 0,5 Km al O. de El Atazar. Atraviesa el Embalse del Atazar, por lo que el acceso a la parte occidental del corte se hace por la N-I, desviándose en el Km 67,5 hacia Cervera, desde esta localidad, se toma la antigua carretera Cervera-El Atazar (hoy abandonada, puesto que está cortada por el embalse); también puede accederse por la pista forestal que desde Robledillo de la Jara (3 Km al N. de Cervera) conduce al vértice Matachines y Collado de Fraguéla. La parte oriental del corte se situa en la carretera de acceso a El Atazar desde Torrelaguna y en el resto de la carretera abandonada Cervera-El Atazar.

Se atraviesan las formaciones Alto Rey, R_1 , R_2 y el muro de R_3 . Solamente se describen, a continuación, las formaciones R_2 y R_3 por ser las únicas de interés para el proyecto:

La Formación R_2 tienen en todo el corte el habitual aspecto masivo, raramente se observa la S_0 ; consiste en pizarras de grano medio a grueso, con blastesis de cloritoide poco evidente, muy mala fisilidad y pirita en cantidades variables; se observaron también nódulos de pirrotina, aplastados, sobre el plano de esquistosidad. En muchos lugares se encuentran crenuladas. Al microscopio se aprecia que contienen unas estructuras redondeadas de tamaño pequeño (0,4 mm), que han sido interpretadas (veáse la muestra 399/85-485-M-LB/134, Anexo 2) como microclastos de rocas esquistosas pre-hercínicas. El espesor de la Formación se ha estimado en unos 500 m.

Sobre R_2 , en el núcleo de un sinclinal menor situado al O. de El Atazar, afloran unos cuantos metros de la parte inferior de R_3 , constituidos por pizarras negras

con algunas laminaciones arenosas, que forman el tránsito con la infrayacente R_1 . Los afloramientos de R_3 son muy pequeños y están bastante recubiertos, por lo que no pueden hacerse sus previsiones.

Estructuralmente, el corte atraviesa totalmente el sinclinal de Peña de la Cabra (FERNANDEZ CASAL, 1976 in GONZALEZ LODEIRO, 1981b), que forma parte del flanco inverso de un gran pliegue de F_1 , cuya charnela y flanco normal se pierden al ser cortados por el cabalgamiento Berzosa-Riaza. La traza axial que parece ser retrovergente, más la S_1 varía de subvertical a buzard 40° al E del sinclinal y sus flancos resultan desplazados por la falla que pasa al N. de El Atazar, falla con movimiento aparentemente inverso, bloque hundido al N y trazado NE-SO. Forma parte del mismo sistema de fracturas que la falla de Almiruete, situada más al E. que VICENTE & UBANEL (1983) consideran de desgarré sinextro, que posteriormente puede haber rejugado con otras componentes de desplazamiento.

Las estructuras menores observadas son pliegues de primera fase con longitud de onda métrica, en la Formación R_2 , flanco occidental subvertical y flanco oriental con la envolvente de la S_0 buzando entre 60 y 75° ; la esquistosidad se dispone en abanico convergente en los anticlinales.

Se han observado dos sistemas de kink-bands: uno, subhorizontal, produce flexiones y alabeos suaves en los planos de S_1 ; el otro, de orientación $120/30$, podría estar relacionado con la falla de El Atazar.

En todo el corte no se ha detectado ningún macizo de pizarras en el que la calidad litológica de éstas sea buena. Ello, junto con la presencia frecuente de kink-bands y diaclasas (especialmente, cerca de la falla de El Atazar) nos hace considerar como desfavorable la zona.

3.1.7. Corte 7. Río LOZOYA-TORTUERO. (Plano nº 8).

Se sitúa este corte dentro de la Hoja del M.T.N. nº 485 (Valdepeñas de la Sierra). De O a E los parajes más cercanos a sus extremos son la confluencia del Arroyo de Reduvia con el río Lozoya (VL 6290.2764) y las cercanías de la población de Tortuero (VL 7025.3065). Su itinerario, de unos 10.5 Km., se ha realizado por la pista que, desde el Km 4,700 de la carretera comarcal a Tortuero, discurre hasta Alpedrete de la Sierra y continúa desde esta población hacia el E hasta su cruce con

el Arroyo de Reduvia y, a partir de aquí, aguas abajo de dicho arroyo hasta su confluencia con el río Lozoya, a pié.

Afloran gran parte de las Formaciones Rodada 2 y Rodada 3, sin que lleguen a emerger la base de aquella y el techo de ésta. Sobre estos materiales ordovícicos se depositan, discordantes, sedimentos mesozoicos (arenas, arcillas, margas y calizas).

Se atraviesan, aproximadamente, 500 m de la Formación Rodada 2 (no se observa el muro), que está constituida por pizarras grises y negras de grano grueso con algún tramo limolítico y, en zonas, bastantes laminaciones arenosas, e incluso, hacia la base, algún pequeño lentejón arenoso. Son abundantes las piritas en cubos, las concreciones ferruginosas y las pátinas de óxidos de hierro sobre los planos de esquistosidad principal.

En los tramos limolíticos es frecuente encontrar estructuras de bioturbación.

Sobre la formación anterior afloran los materiales de la Formación Rodada 3, de la que se atraviesan unos 400 m. (no se observa el techo); está compuesta por alternancias de pizarras grises con laminaciones arenosas, limolitas negro-grisáceas, areniscas y cuarcitas en bancos decimétricos. Hacia el techo las areniscas y cuarcitas se presentan en bancos más potentes, 1-2 m., y contienen algunas intercalaciones lenticulares de calizas bastante arenosas (ver ficha petrográfica 399/85-485-GU-VP/111). Son abundantes las estructuras de bioturbación, ripples, huellas de carga y laminaciones paralelas y cruzadas.

La macroestructura más importante, de orden kilométrico, es el sinclinorio de Reduvia; cuyo núcleo (donde no llega a aflorar la Formación Rodada 4) se detecta en el arroyo del mismo nombre, aproximadamente 1,5 Km. antes de su desembocadura en el río Lozoya. Tiene plano axial subvertical de dirección meridiana y eje con inmersión, 15°, al S. Sobre sus flancos aparecen pliegues menores acompañantes de dimensiones métricas a decamétricas. Estas estructuras se relacionan con la primera fase hercínica.

Se manifiesta una única esquistosidad que se asocia a la primera fase de deformación, S_1 (ver fichas petrográficas 399/85-485-GU-VP/105 a VP/110). En los materiales más micáceos es del tipo slaty cleavage pasando, según aumenta el carácter cuarzoso, a un slaty cleavage grosero o a una esquistosidad grosera. Su dirección es N-S y buzamiento subvertical. En el área del cruce del Arroyo de Reduvia con la pista que procede de Alpedrete de la Sierra, se observa, sobre los planos de S_1 , una tenue lineación de crenulación, L_c 130/20, que no lleva aparejada esquistosidad secundaria.

Hay un sistema de kink-bands, no excesivamente intenso, con plano axial de dirección NE-SO y subvertical o con fuerte buzamiento al NO.

El fuerte carácter arenoso, la abundancia de laminaciones arenosas, el tamaño grueso del grano o la presencia de metálicos y óxidos de Fe, en los niveles pizarrosos de una u otra de las Formaciones atravesadas constituyen un conjunto de características litológicas negativas que no permiten considerar este área como especialmente favorable para la explotación industrial de pizarras ornamentales.

3.1.8. Corte 8. Arroyo de PELAGALLINAS. (Plano nº 9).

Este corte se localiza en la hoja de Atienza (433) del M.T.N., con un trazado E-O por la loma que separa los arroyos de Los Condemios y de Pelagallinas, con una longitud de unos 4,5 Km. Se accede a él por la pista forestal que parte del Km. 24,8 de la carretera local de Hiendelaencina a Los Condemios, hacia el E, muriendo cerca del punto de coordenadas VL 9550.6100.

Se atraviesan el techo de la Formación R_1 , y casi toda la Formación R_2 , aunque el techo de ésta no llega a tocarse.

El tramo visible de R_1 , está constituido por alternancias decimétricas de limolitas y pizarras, con estratificación cruzada y bioturbación. La esquistosidad S_1 se encuentra fuertemente crenulada por la S_3 , la que se desarrolla muy bien en las capas pelíticas y peor en las arenosas (Fotografía nº 16, página 29).

R_1 debuta, al igual que en otros lugares, con unos metros de pizarras de grano fino con escasas laminaciones arenosas milimétricas, que hacia arriba pasan a las típicas pizarras masivas de grano medio a grueso, en general con bastante pirita y pésima fisilidad. A lo largo de todo el corte se encuentran intensamente crenuladas.

Desde el punto de vista estructural, el corte se encuentra en un gran flanco de pliegue de F_1 , replegado por un sinclinal de F_3 de gran importancia: es el responsable de la retrovergencia de las estructuras de F_1 al E. de este corte, en la comarca de Atienza. Este sinclinal fué ya detectado por GONZALEZ LODEIRO (1981 b), que dibuja su superficie axial suavemente curvada en corte, y discurriendo con una dirección aproximada a la de los pliegues de F_1 . En nuestro corte se observa como la S_1 buza al O en el occidente y al E en la parte oriental, estando en la parte central intensamente deformada por crenulaciones y micropliegues de F_3 .

La estructura menor más evidente en el campo es la esquistosidad de F_3 , que es de crenulación, con un espaciado medio de décimas de milímetro (veáanse las muestras 399/85-433-GU-LB/144 a 150, Anexo 2), que borra casi por completo a la S_1 . Es frecuente la aparición de bandeo tectónico de F_3 , que puede incluso apreciarse en el campo. Ambas estructuras buzán al NE alrededor de 15° .

En algunos lugares se aprecian otras crenulaciones, posteriores a la formación de S_3 ya que la afectan, con orientaciones variables. Unas están cercanas a $350/65$, y las atribuimos a F_4 , mientras que otras subverticales ($150/90$) pueden corresponder a F_5 .

Además de ello, en la parte oriental del corte se han observado kink-bands subhorizontales.

La intensa deformación de F_3 sufrida por las pizarras en la zona, así como su baja calidad litológica hacen que sea considerada como desfavorable.

3.1.9. Corte 9. SANTOTIS-ROBREDARCAS. (Plano nº 10).

Está totalmente incluido en la hoja de Hiendelaencina (466) del M.T.N. Discurre en una longitud de unos 4 Km., por la pista que une las dos localidades que le dan nombre, ambas despobladas; dicha pista parte del Km. 5,4 de la carretera local de Veguillas (al N. de Cogolludo) a El Ordial.

El muro de la serie atravesada lo constituye la Formación Alto Rey, estando sobre él sucesivamente las formaciones R_1 , R_2 y la parte baja de R_3 , aflorando esta última en el núcleo del sinclinal que constituye la estructura general de la zona. Sus características se detallan a continuación:

La Formación R_1 , presenta una potencia aproximada de 125 m. Está constituida por pizarras grises y negras, areniscas y cuarcitas. El contenido en cuarcitas va aumentando hacia el muro del tramo.

Se observan laminaciones cruzadas en el flanco E. del Sinclinal que indican que es un flanco normal (Techo al O).

Por su parte, las pizarras de R_2 presentan una potencia aproximada de 625 m. en el flanco E del Sinclinal. Son pizarras negras de grano fino en general, a veces fino-medio, en su mayor parte bastante homogéneas que presentan algunas laminaciones limolíticas a muro, en las proximidades de la serie de transición y a techo en tránsito gradual a las "pizarras laminadas".

Hacia techo se han encontrado restos fósiles en su mayoría inclasificables, que podrían ser bivalvos y braquiópodos.

Al microscopio están constituidas fundamentalmente por micas blancas (moscovita, fengita, sericita) y clorita y en menor proporción cuarzo, como minerales principales. Como accesorios suelen presentar minerales opacos, circón, turmalina, rutilo y leucóxenos y en algún caso esfena y anatasa. La clorita a menudo se presenta como blastos precinemáticos de mayor tamaño que el resto de los minerales llegando a alcanzar 0,4 mm.

La parte visible de R_3 tiene una potencia de unos 100 m y no se ha visto su techo.

Está constituido por pizarras negras, pizarras arenosas, ambas con finas laminaciones limolíticas, limolitas y areniscas de grano fino a muy fino, de tonos grises y amarillentos.

Al microscopio se observan finos niveles alternantes, pelíticos y cuarzosos, que a veces presentan granoclasificación positiva y cicatriz erosiva en la base.

Están constituidos por cuarzo y micas blancas predominantemente y en menor proporción clorita como minerales principales. Como minerales accesorios presentan minerales opacos, turmalina y rutilo. Se observaron blastos de clorita de hasta 0,3 mm precinemáticos.

El Sinclinal de Santotis es un sinclinal de primera fase hercínica vergente al E, con una traza axial de dirección aproximada N150E, afectado por un plegamiento posterior (fase 3) retrovergente con un plano axial inclinado unos 25-30° E y una dirección que varía entre N-S y N150E.

En el flanco E. la fase 3 apenas si produce una débil crenulación en algunos puntos, siendo la esquistosidad principal, y a veces única presente, la S_1 . En el flanco O. se observa un mayor desarrollo de crenulación de tercera fase, sobre todo en los niveles más pelíticos, llegando a producir una esquistosidad incipiente e incluso bandeo tectónico. En los niveles más cuarzosos su desarrollo es escaso o nulo.

Al microscopio se observan a veces en el flanco O., pliegues de primera fase sobre la estratificación con desarrollo de una slaty cleavage de plano axial (S_1) que está crenulada por la tercera fase.

Los minerales metamórficos encontrados son micas blancas de tipo sericita, fengita y clorita sobre todo, por lo que el área estudiada debe estar en bajo o muy bajo grado metamórfico.

Los blastos de clorita precinemáticos respecto a la S_1 observados pueden ser de origen diagenético o bien desarrollados en una primera etapa metamórfica antes del desarrollo de la esquistosidad.

La calidad de las pizarras es muy baja; únicamente alguna delgada capa del muro R_2 tiene fisilidad mediana, siendo el resto inexplorable, pero las intensas crenulaciones y otras discontinuidades estructurales impedirán el aprovechamiento de estas capas delgadas. Por ello, clasificamos la zona como desfavorable.

3.1.10. Corte 10. Río BORNOVA-CAÑAMARES. (Plano nº 11).

Está situado en la hoja de Atienza (433) del M.T.N. Se realizó por el camino real de Prádena, pista sin asfaltar que discurre entre Prádena de Atienza, al S y Cañamares, al N. Empalma con la carretera C-114 donde ésta atraviesa el río Cañamares, junto a esta localidad.

El corte tiene una longitud de unos 5 Km., atravesándose las formaciones Rodada 2 (techo), Rodada 3, Rodada 4 y Rodada 5, así como las suprayacentes formaciones del Silúrico (Santibañez y Cañamares). Hacia el N los materiales paleozoicos quedan recubiertos por vulcanitas y arcillas del Pérmico. El río Bornova discurre bastante encajado por la zona, siendo los escarpes de su valle excelentes afloramientos de

R₃ y del muro de R₄ en las cercanías del Molino de Bornova (WL 0145.5915).

Las pizarras de R₂ son masivas, con muy baja fisilidad y abundantes minerales metálicos. Esta litología la conserva a lo largo de todo el corte.

El tránsito entre R₂ y R₃ está constituido por alternancias métricas de pizarras de grano fino con limolitas y pizarras con laminaciones. Sobre ellas, un grueso paquete de pizarras con laminaciones más o menos abundantes constituye los dos tercios inferiores de la columna de R₃; la parte alta es mucho más arenosa, encontrándose paquetes de arenisca de hasta 10 m., de espesor separados por capas métricas de pizarras y limolitas. Se han observado muchas estructuras sedimentarias tales como bioturbación, estratificación flaser, estratificación ondulada hummocky, ripples liguoides, etc.... El espesor de R₃ en este corte es de unos 360 m.

R₄ está constituido por pizarras masivas de color gris oscuro, con porcentaje variable de piritita. Su fisilidad varía de buena a muy buena, habiendo sido objeto de tentativas de explotación en las cercanías del corte, en las canteras del Bornova. Su espesor aparente en el corte es de unos 300 m., pero durante la fase de investigación posterior se vió que este espesor está exagerado por dos pliegues de F₁ y una falla, de forma que el espesor real está en torno a los 100 m.

R₅ se observa mal, ya que está muy recubierto y su litología es fácilmente alterable. Está constituido por pizarras limolíticas, limolitas y areniscas con cantos de caliza o huecos de disolución de dichos cantos. Las estructuras sedimentarias observadas son estratificación cruzada y starved ripples.

Por contacto mecánico, se pasa a la Formación Cañamares, no encontrándose en el corte la Formación Santibañez, que sin embargo aflora unos centenares de metros al SE. del corte.

La estructura general de la zona es la de un gran flanco inverso de F₁, retrovergente por efecto de la F₃ ya que está en el flanco inverso del sinclinal de F₃ detectado en el corte 8. Los pliegues de F₁ no son muy abundantes, aparentemente, y en esta fase no se detectó ninguno importante; sin embargo, durante las investigaciones posteriores se vió que el corte atraviesa dos planos axiales de F₁, que pliegan la formación R₄ exagerando su espesor (comparense los cortes de los planos nº 11 y nº 15).

Las estructuras menores presentes son la esquistosidad de F₁, la crenulación de F₃ y la crenulación de F₄. Fué en este corte donde por primera vez se observó la relación F₃-F₄, al existir crenulaciones, más verticales que las de F₃, que pliegan las S₃. La S₁ retrovergente tiene orientaciones próximos a 50/45, mientras que S₃ es 40/30. S₄, por su parte, es más variable pero en general está orientada 30/80.

Se observaron y midieron varias familias de diaclasas, algunas de ellas muy densas, siendo las principales las 140/90, 60/45, 240/45 y 20/50 (comparense las familias obtenidas en la fase de investigación posterior, apartado 4.3). Kink-bands se midieron con orientaciones 350/17, y crenulaciones tardías, quizás relacionadas con fallas, 80/20 y 230/65.

La calidad litológica de las pizarras de la Formación Rodada 4 es buena, descartándose las demás. Se han observado tramos más y menos oxidables dentro de ella, siendo este y las discontinuidades estructurales (kink-bands, fracturación, etc) los únicos factores limitantes de la explotabilidad de las capas de R₄ en la zona. Por tanto, se seleccionó ésta como Zona de Interés Prioritario (veáse el apartado 3.3).

3.2. LABORES MINERAS ANTIGUAS

A lo largo de la exploración se puso especial interés en la localización de antiguas canteras de pizarras, como indicios que son de la existencia de macizos rocosos explotables. Previamente al comienzo de los trabajos se sabía ya que existían explotaciones abandonadas en Naharros y el cerro de La Rodada, ambos en la comarca de Atienza. Se localizaron algunos más, cuyas características y situación se detallan más abajo.

Se ha de advertir que todas ellas, menos una, se explotaron de forma artesanal, extrayéndose los bloques con cuñas y otros medios manuales, por lo que el tamaño de bloque no podía ser muy grande. Así, hemos comprobado que los antiguos canteros elegían macizos rocosos con un diaclasado más bien denso (diaclasas separadas en general menos de 1 m), despreciando macizos próximos que, según los modernos métodos de extracción con maquinaria, darían un tamaño de bloque mayor y más rentable. Por tanto, no siempre una cantera antigua es un indicio importante (aunque, eso sí, la calidad litológica de la roca suele ser buena, especialmente en lo que respecta a la fisilidad).

A continuación se relacionan los indicios visitados, por orden de importancia.

* Cantera de La Rodada. Situada en la hoja de Hiendelaencina (460) en el punto de coordenadas WL 0330.5705, su único acceso es por la pista que parte del Km. 59,4 de la carretera Hiendelaencina-Atienza, a la altura del cruce con el camino local que va a Robledo de Corpes, pero en la mano contraria; es una pista sin asfaltar, de 9 Km de longitud, transitable incluso en invierno con vehículo de turismo.

Es una cantera de tamaño pequeño (comparada con los existentes en el NO. y otras zonas de España) pero es la única que empleó medios mecánicos (maquinaria) en la explotación. Los bloques extraídos se trasladaban a una nave de labrado que existía en Hiendelaencina, a unos 15 Km de distancia, hoy desmontada (el edificio se encuentra en regulares condiciones de conservación y de maquinaria solo queda el puente-grúa instalado).

Explotaba pizarras de la parte media de la formación R_4 , siendo la dirección de avance del frente perpendicular a la estratificación (por lo que fué cortando capas cada vez más bajas al avanzar). La masa de pizarras a explotar está limitada al N. por una banda de deformación de F_3 interna, aunque lateralmente (en dirección), no parece estarlo (veáse el apartado 5.2.3).

* Canteras del Bornova. Es un conjunto de canteras y catas muy pequeñas (Fotografía nº 25), situadas en la hoja de Atienza (433) en el punto de coordenadas WL 0200.5945. Se accede a ellas por el camino real de Prádena, que parte hacia el S desde el Km. 59 de la carretera C-114, en las inmediaciones de Cañamares; la pista es transitable en invierno solo en vehículo todo-terreno.

Las labores de extracción se llevaron a cabo con medios manuales exclusivamente, aunque existen en las escombreras restos de placas y losas serradas con disco, por lo que es posible que se cortaran con una sierra pequeña de gas-oil para facilitar la elaboración de la pizarra.

Se extrajo pizarra de la parte media e inferior de R_4 , siendo varias las capas explotadas (apartado 5.2.3).

* Calicatas de Naharros. En varios puntos al O. de esta aldea, situada en la carretera Atienza-Hiendelaencina, se encuentran pequeñas catas (de apenas unos metros cúbicos), explotadas por los vecinos. Destacan las de coordenadas WL 0590.5745, WL 0585.5750 y WL 0550.5710. El acceso a ellas es unicamente a pié, vadeando el rio Cañamares para las dos últimas. Son pizarras de R_4 , intensamente afectadas por las crenulaciones y el diaclasado.

* Cantera de Majaelrayo. Está situada al N de esta localidad, en la hoja de Tamajón (459) del M.T.N., con las coordenadas VL 7380.5690. Se accede a ella por la pista de Majaelrayo a Cantalojas, desviándose al O. a unos 6 Km de la primera localidad, precisamente en la divisoria entre los términos municipales de Valverde de Los Arroyos y Majaelrayo por un camino de unos 500 m de longitud que llega a la cantera.



FOTOGRAFIA Nº 25.- Canteras y catas del Bornova, zona Bornova-Rodada, O. a la derecha.

Es una explotación semiactiva, ya que pertenece al Ayuntamiento de Majaelrayo, y los vecinos lo pueden explotar esporádicamente mediante el pago de un pequeño cánon.

Se encuentra en una capa de pizarra de la parte inferior de R₃, de regulares características litológicas, pero de poco espesor (una decena de metros).

Además de lo anterior, son innumerables las pequeñas catas y socavones que se han encontrado, casi siempre cerca de los pueblos, y que sirvieron para extraer piedra para las edificaciones.

3.3. RESULTADOS DE LA FASE DE EXPLORACION

Pueden sintetizarse los resultados obtenidos en esta fase de la siguiente forma:

* La única formación con perspectivas de ser explotable en cuanto a la calidad litológica de la pizarra, es la Formación Rodada 4.

* Las zonas donde los factores tectónicos condicionan menos la explotabilidad de los macizos son en la comarca de Atienza (Zonas del Bornova-Rodada y Los Prados-Valdejudios).

* Las capas bajas de la Formación Rodada 3 tienen regulares características litológicas en el Sinclinal de Majaelayo, pero su reducido espesor limita su explotabilidad.

* La mayoría de las labores antiguas visitadas son inexplotables con métodos modernos debido a la fracturación del macizo rocoso. Únicamente la cantera de La Rodada se sale de esta regla.

* Se eligen, por tanto, las zonas del Bornova-Rodada y Los Prados-Valdejudios, como Zonas de Interés Prioritario, para investigar con más detalle.

Como resultados no estrictamente contemplados en los objetivos del proyecto, pero de gran importancia geológica se pueden apuntar:

* Se propone denominar Grupo Rodada a los materiales situados entre la Cuarcita Armoricana o Formación Alto Rey y la Cuarcita silúrica de la Formación Santibañez, dividiendola en cinco formaciones. Tales formaciones afloran, en las comarcas de Atienza y Riaza las cinco, y en el centro y sur del Sinclinal de Majaelayo, las tres inferiores.

* El Sinclinal de Majaelayo no es de primera fase hercínica, sino que parece ser el flanco largo de un pliegue de F_1 replegado por movimientos posteriores a la F_3 .

4. FASE DE INVESTIGACION PREVIA

4.1. CARTOGRAFIA GEOLOGICA Y CORTES LITO-ESTRUCTURALES

4.1.1. Estructura general de las Zonas de Interés Prioritario

En base a los resultados obtenidos en la Fase de Exploración y a la vista de la Cartografía MAGNA existente, se demarcaron las dos zonas que se presentan en el plano nº 13, y que denominamos Bornova-Rodada (la más occidental) y Los Prados-Valdejudios.

Ambas zonas fueron cartografiadas a escala 1:25.000, sobre una base topográfica especialmente restituida para el proyecto. Al mismo tiempo, se realizaron seis cortes lito-estructurales a escala 1:10.000, que determinaron en detalle la estructura de la banda pizarrosa y la columna de las formaciones atravesadas.

La figura 3 es un bloque-diagrama a escala 1:50.000 en perspectiva axonométrica, de la estructura geológica en la comarca de Atienza. Se observa como los planos axiales de los pliegues de F_1 estan replegados a su vez por el sinclinal de F_3 cuya traza axial pasa al E. de Prádena de Atienza, haciendo que desde dicha traza hacia el E. las estructuras de F_1 se dispongan retrovergentes (esto es, la esquistosidad buza al N ó NE).

El pliegue de 3ª fase no tiene representación cartográfica porque su charnela coincide con un ancho afloramiento de pizarras de R_2 , en las que las capas (la estratificación) son difícilmente observables, por lo que el MAGNA no las ha cartografiado, (no ha separado miembros dentro de R_2).

Además, existen pliegues tardíos (probablemente de F_5) que podrían ser los responsables del giro de las estructuras en la parte SE. de la zona de Bornova-Rodada, donde la S_1 pasa de buzar al NE, a buzar al N. e incluso al NO, y de la zona de Los Prados-Valdejudios, donde el giro es en sentido contrario, de NNE a E. GONZALEZ-LODEIRO (1981 b) interpreta esta estructura como dos pliegues cónicos, formados por arrastre de la falla de Cañamares, de movimiento fundamentalmente en dirección.

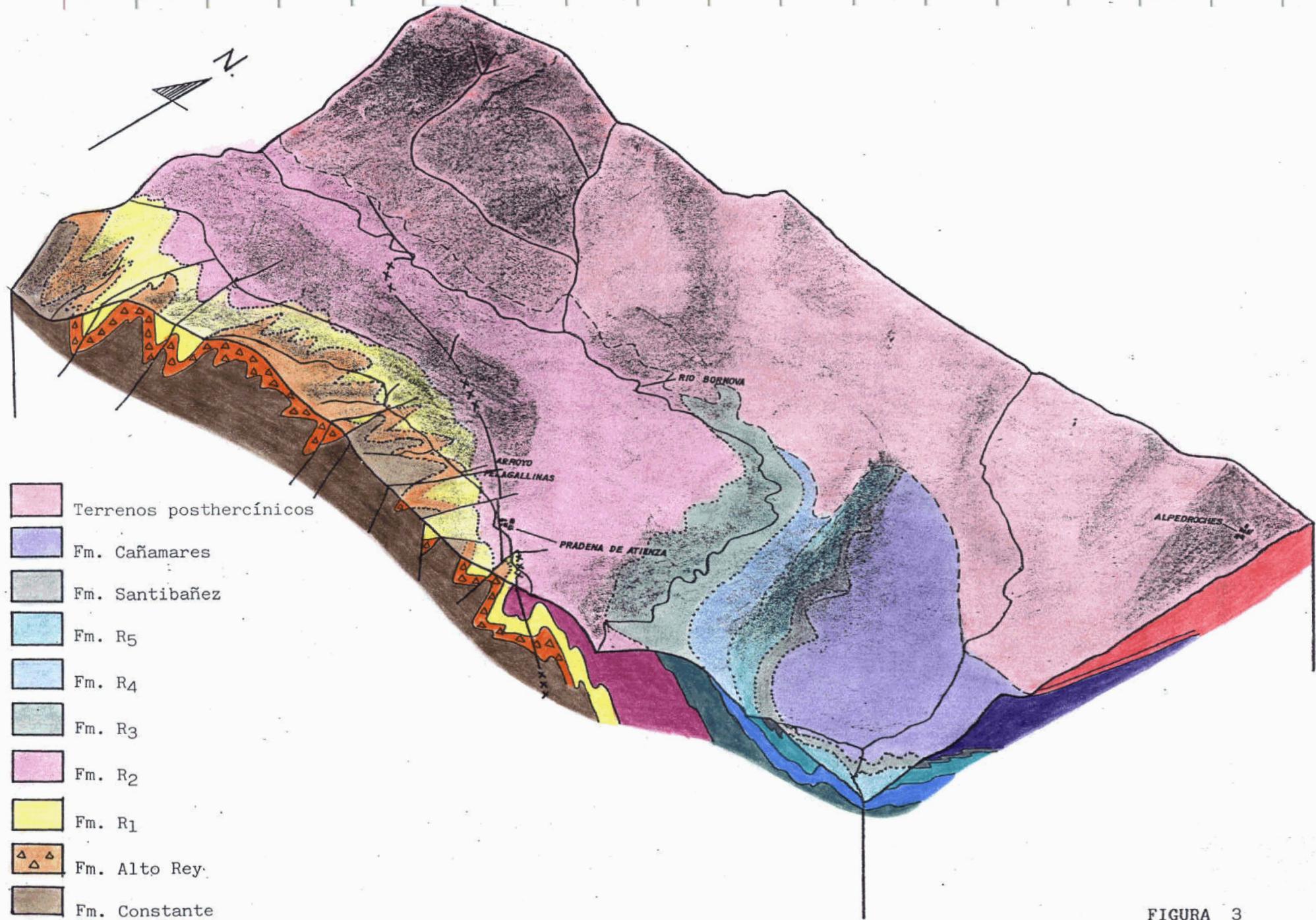


FIGURA 3

4.1.2. Zona del Bornova-Rodada

La Formación R_4 aflora en una longitud de unos 11 Km (Fotografía nº 26). Se han localizado dos pliegues (sinclinal-anticlinal) de F_1 que repiten la serie en las canteras del Bornova, donde una anchura de afloramiento mayor, y duplicando el contacto R_4-R_5 en el Molino de Lucientes. También se han cartografiado varias fallas de dirección NNO-SSE y N-S que adelgazan hasta casi hacerlo desaparecer el afloramiento de R_4 .

En el Molino de Lucientes se han dibujado dos trazas axiales de pliegue de F_4 , pliegues suaves que unicamente producen cambios en la dirección de S_0 y S_1 , y en cartografía un giro de pocos grados en las trazas de capa.

Los cortes A-A', B-B', C-C' y C-D' (Planos nº 14 y 15) han precisado en detalle la estructura y la litología de la zona.

La deformación de F_4 afecta intensamente la mitad septentrional de la zona (Fotografía nº 27), aproximadamente donde el paralelo 60 UTM hacia el N. Además, frecuentes diques de cuarzo y fracturación intensa afectan la zona. Todos estos datos se recogen en el plano nº 18. Los datos de fracturación se comentan en detalle más adelante.

4.1.3. Zona de Los Prados-Valdejudios

En esta zona, de reducida extensión, aflora R_4 en unos 4 Km de longitud. Los afloramientos son malos, estando bastante recubiertos por aluviones y derrubios de ladera. Sin embargo se ha podido reconstruir la estructura en detalle de la zona (Cortes E-E' y F-F', plano nº 16) que es bastante sencilla; se trata de un flanco inverso basculado de F_1 con suaves pliegues menores. La S_3 y S_4 afectan a la zona, especialmente al E de la carretera C-101, donde son responsables, aparentemente, del aumento de la anchura de afloramiento de R_5 hacia el O. En menores puntos se observa que la esquistosidad principal de la pizarra es S_3 , a veces con un espaciado muy cerrado y bandeado tectónico (Fotografías nº 28 y nº 29).

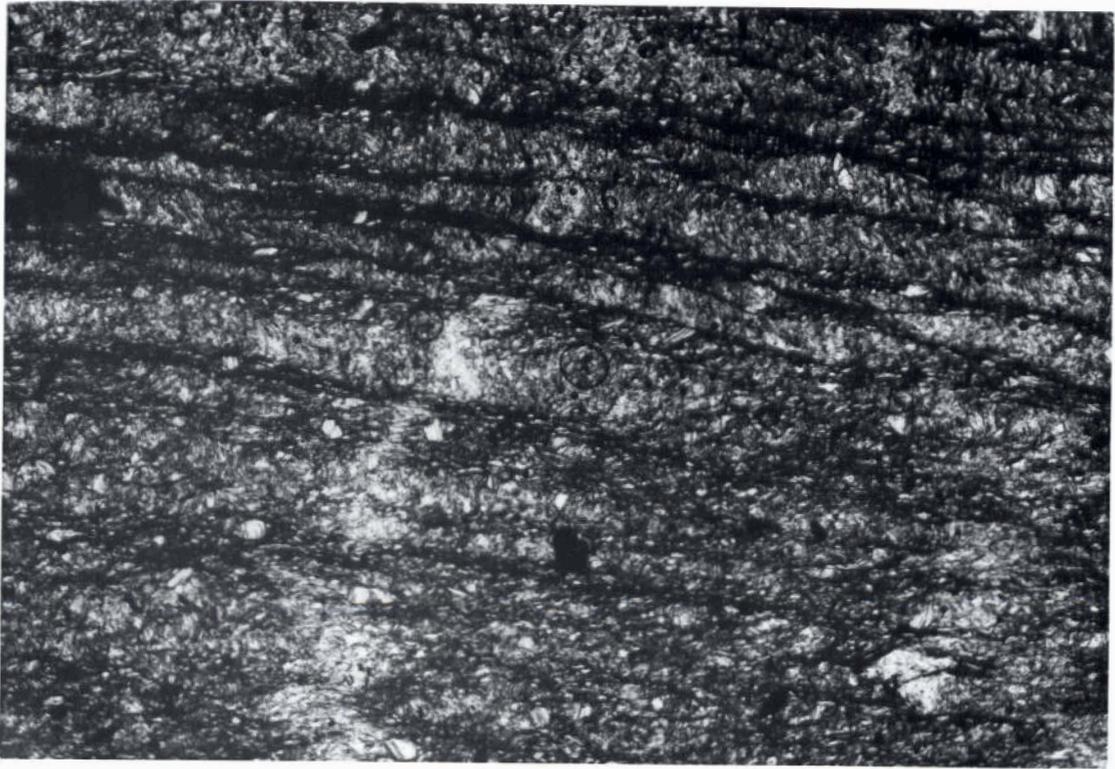
Se han medido numerosos kink-bands y diaclasas perpendiculares a las estructuras de F_1 y F_3 , que pueden atribuirse a F_5 . Los datos al respecto se recopilan en la plano nº 18.



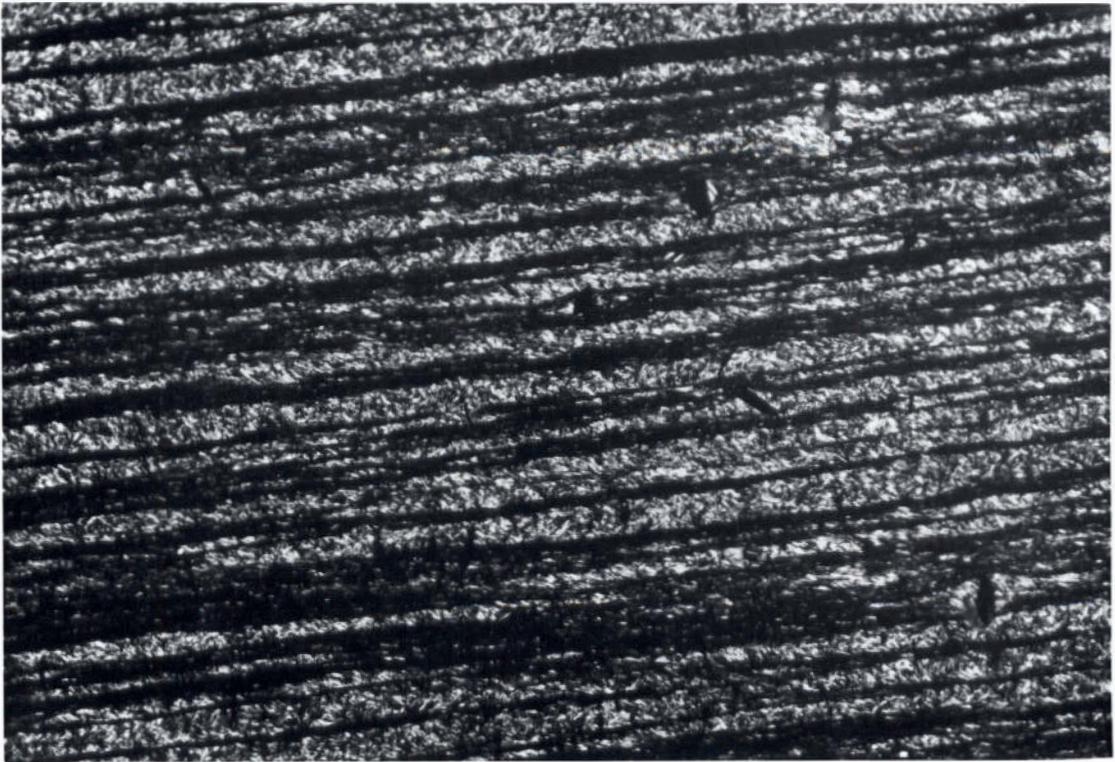
FOTOGRAFIA N^o 26.- Afloramientos de la cuarcita de la Formación Santibañez (resalte en lo alto de la ladera), R₅ y R₄ en las canteras del Bornova. Zona Bornova-Rodada, N. a la izquierda.



FOTOGRAFIA N^o 27 (Microfotografía n^o LB/153-A).- La S₀ es subparalela a S₁, la cual está microplegada, con bandeado tectónico acompañante (bordes claros horizontales) por F₃. Crenulación posterior de F₄, subvertical. Pizarras de R₄ en el Molino de Lucientes, Zona Bornova-Rodada. X22, N//.



FOTOGRAFIA N° 28 (Microfotografía n° LB/151-A).- Pizarra de R_4 con esquistosidad principal S_3 de crenulación; la S_0 está representada por las bandas claras oblicuas. Loma de Valdejudios, zona de Los Prados - Valdejudios. X22, N//.



FOTOGRAFIA N° 29 (Microfotografía n° VP/131-A).- Intensa esquistosidad de crenulación S_3 en pizarras de R_4 . Loma de Valdejudios, zona Los Prados-Valdejudios.

4.2. SONDEO MECANICO

Se perforó un sondeo mecánico, denominado S-1, de 115,15 m. de longitud en la zona de Bornova-Rodada, concretamente en el punto indicado en el plano nº 15, con extracción de testigo continuo. Su orientación e inclinación fueron 220/18, lo que es casi perpendicular a la estratificación. El testigo obtenido varió su diámetro de 101 mm a 50 mm (Fotografía nº 30).

La finalidad principal de sondeo fué el reconocer en todo su espesor a la formación R_4 (Fotografía nº 31), obteniendo muestras frescas en profundidad, confirmar la estructura deducida por la geología de superficie y tomar orientaciones del diaclasado con el fin de correlacionar los datos de fracturación en superficie y en profundidad.

Todos estos objetivos se han cumplido, obteniéndose datos valiosísimos que confirman el sondeo mecánico como una herramienta de investigación muy útil.

En el estudio del testigo se han tomado datos sistemáticos de los siguientes aspectos: Profundidad y cota S.N.M diámetro del testigo y tipo de corona de perforación utilizada, descripción litológica del testigo, grado de meteorización, estructuras sedimentarias observadas, rumbo y valor del buzamiento de la S_0, S_1, S_3 , kink-bands, fracturas, naturaleza y relleno de las fracturas, espaciado R.Q.D. y observaciones. Los resultados obtenidos se han representado en el plano nº 17.

En algunos casos no ha sido posible medir la orientación completa de algunos planos (sean de S_0, S_3 , etc), anotándose de ellos el ángulo β que forma con el eje del sondeo. Asimismo, el espaciado R.Q.D. (Rock Quality Designation), definido como el porcentaje de recuperación de testigo en fragmentos de mas de 10 cm. de longitud no ha podido medirse en algunos tramos donde la recuperación de testigo entero ha sido baja por defecto de extracción (es decir, se apreciaban numerosas roturas no tectónicas, sino mecánicas, por mal funcionamiento del tubo testiguero).

A pesar de todo ello, se han localizado varios tramos de pizarra de calidad litológica buena y muy buena, entendiendo por calidad litológica la calidad de la roca prescindiendo de los factores tectónicos



FOTOGRAFIA N° 30.- Sondeo realizado en las Cante_ ras del Bornova, zona Bornova-Rodada.



FOTOGRAFIA N° 31.- Emplazamiento del sondeo a techo de la Formación R₄.
Misma localidad que la fotografía anterior.

(fracturación, crenulaciones). Los más importantes se encuentran de 29 a 35 m y de 60 a 75 m., aunque en general casi toda la columna puede clasificarse como explotable desde el punto de vista litológico.

Sin embargo, la fracturación es, por tramos, muy intensa, siendo raros los fragmentos de testigo de más de 50 cm. de longitud. Allí donde es especialmente densa se ha marcado en el gráfico con una sobrecarga. Los datos de fracturación se comentan más ampliamente en el apartado 4.3.

Respecto del grado de meteorización, se ha aplicado según el criterio de MOYE, que se incluye a continuación.

ESCALA DE METEORIZACION DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS DETRITICAS

(Basada en la de D.G. Moye)

<u>GRADO DE METEORIZACION</u>	<u>DENOMINACION</u>	<u>CRITERIOS DE RECONOCIMIENTO</u>
I	Sana	Roca no meteorizada. Conser <u>va</u> el color lustroso en to <u>da</u> la masa.
II	Sana con jun <u>tas</u> teñidas de óxido	Las caras de las juntas es <u>tán</u> manchadas de óxido pero el bloque unitario entre jun <u>tas</u> mantiene el color lustro <u>so</u> de la roca.
III	Moderadamente meteorizada	Claramente meteorizada a tra <u>vés</u> de la petrofábrica, re <u>conociéndose</u> el cambio de co <u>lor</u> respecto de la roca sa <u>na</u> . El cambio de color pue <u>de</u> ser desde simples man <u>chas</u> a variación de color de toda la masa, generalmente a colores típicos de óxidos de hierro. La resistencia de la roca puede variar desde muy análoga a la roca de gra <u>do</u> II a bastante más baja , pero tal que trozos de 25 cm de sección no puede rom <u>perse</u> a mano.
IV	Muy meteoriza <u>da</u>	Roca intensamente meteoriza <u>da</u> que puede desmenuzarse a mano y romperse.
V	Completamente meteorizada	Material con aspecto de sue <u>lo</u> completamente descompues <u>to</u> por meteorización "in si <u>tu</u> " pero en el cual se pue <u>de</u> reconocer la estructura de la roca original.

4.3. ESTUDIO DE LA FRACTURACION

4.3.1. La fracturación como factor limitante de la explotabilidad

Resulta obvio recordar la gran importancia que tiene el estado de fracturación del macizo rocoso en la explotabilidad de la pizarra y del resto de las rocas ornamentales. RABU & CASTAING (1978) suponen que la existencia de más de tres familias de diaclasas bien desarrolladas es criterio suficiente para calificar un yacimiento de granito como no explotable. LE CORRE (1970) destaca que la determinación del estado de fracturación es la parte más delicada de la investigación del yacimiento, más de su resultado final dependen las posibilidades de explotación las capas de pizarra.

Por nuestra parte destacaremos que en las áreas que hemos seleccionado para ulteriores investigaciones (véase el apartado 4.4 y el plano nº 18) existen varias capas de pizarra de buena calidad, cuya explotabilidad está únicamente condicionada porque el juego de diaclasas permita obtener un bloque o "rachón" lo suficientemente grande.

Desde un punto de vista teórico, el bloque mínimo explotable sería el que permitiera extraer placas de la medida comercial más corriente (22 x 32 cm), por lo que bastaría con un bloque de unos 25 x 35 cm de base y altura conveniente para ser trabajado en las mesas de labrar (unos 25-30 cm), lo que da un volúmen del orden de $0,025 \text{ m}^3$. Sin embargo, con bloques de estas dimensiones el rendimiento de la cantera sería muy bajo. Las dimensiones mínimas reales del rachon son variables, dependiendo de la cantera y de la calidad de la pizarra, y habrán de evaluarse cuidadosamente en el caso de que se prosiga con investigaciones posteriores, pero basándonos en los que se extraen en las canteras de Valdeorras y otros lugares de España, estimamos que el bloque mínimo real para que el yacimiento sea explotable debe de tener un volúmen del orden de 10 veces mayor.

Tiene una enorme importancia, también, la disposición de las familias de diaclasas con respecto a la esquistosidad principal de la pizarra; los sistemas que forman un ángulo bajo con ésta son los más perjudiciales, ya que delimitan bloques con la esquistosidad de forma no prismática sino piramidal, con gran desperdicio de roca en los extremos, que no alcanzan una altura mínima y han de ser serrados y desechados; además, si el ángulo es muy bajo, la pizarra forma cuñas al ser hendida en lugar de placas de caras paralelas.

4.3.2. Método de estudio de la fracturación

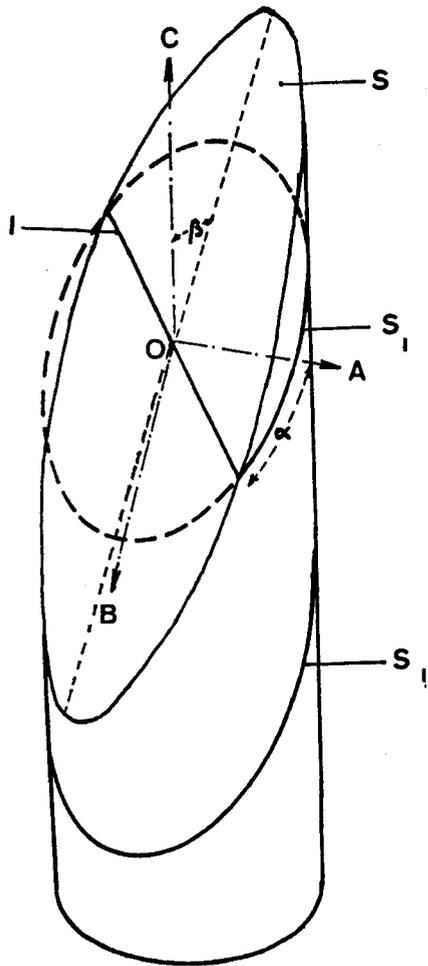
Se ha realizado un estudio regional de la fracturación, incluyendo en él aquellas estructuras tales como "kink-bands" y crenulaciones tardihercínicas, que si bien no son fracturas en sentido estricto, si son discontinuidades que inciden negativamente en la explotabilidad de los yacimientos de pizarra.

Por una parte, se han medido en superficie las fracturas más frecuentes en todo el área del estudio, representándose los datos en proyección Lambert (Falsilla de Schmidt) con trazado de las correspondientes curvas de densidad para separarlas en familias (Falsilla de contaje de Kalsbeek, RAGAN 1980).

Además, se realizó una medida sistemática de diaclasas y fallas en el testigo del sondeo, cuyo tratamiento resultó más laborioso. El método seguido se expone a continuación, con la ayuda de la figura 4.

El sondeo se perforó con una orientación de 215/73 (esto es, con una inclinación de 17° con respecto de la vertical) y la esquistosidad principal (S_1) en aquella zona está orientada 50/35, por lo que el eje del sondeo no es perpendicular a la esquistosidad y su intersección con el cilindro de la perforación es una elipse: si suponemos que la orientación de la esquistosidad no varía a lo largo de todo el sondeo, en el testigo tenemos unos planos de referencia (los de S_1), cuya intersección con el sondeo da elipses con ejes mayor y menor de orientación conocida. Por tanto, cualquier otro plano (S), sea falla, diaclasa o plano de estratificación, podrá orientarse tomando como referencia los planos de esquistosidad.

Supongamos que un plano S corta al testigo según la elipse de la figura 4; tomemos como ejes de referencia el eje del sondeo (OC), y los semiejes menor (OA) y mayor (OB) de la elipse de intersección de



DISPOSICION DE LOS EJES A, B y C y DE LOS ANGULOS α y β EN UN FRAGMENTO DE TESTIGO.

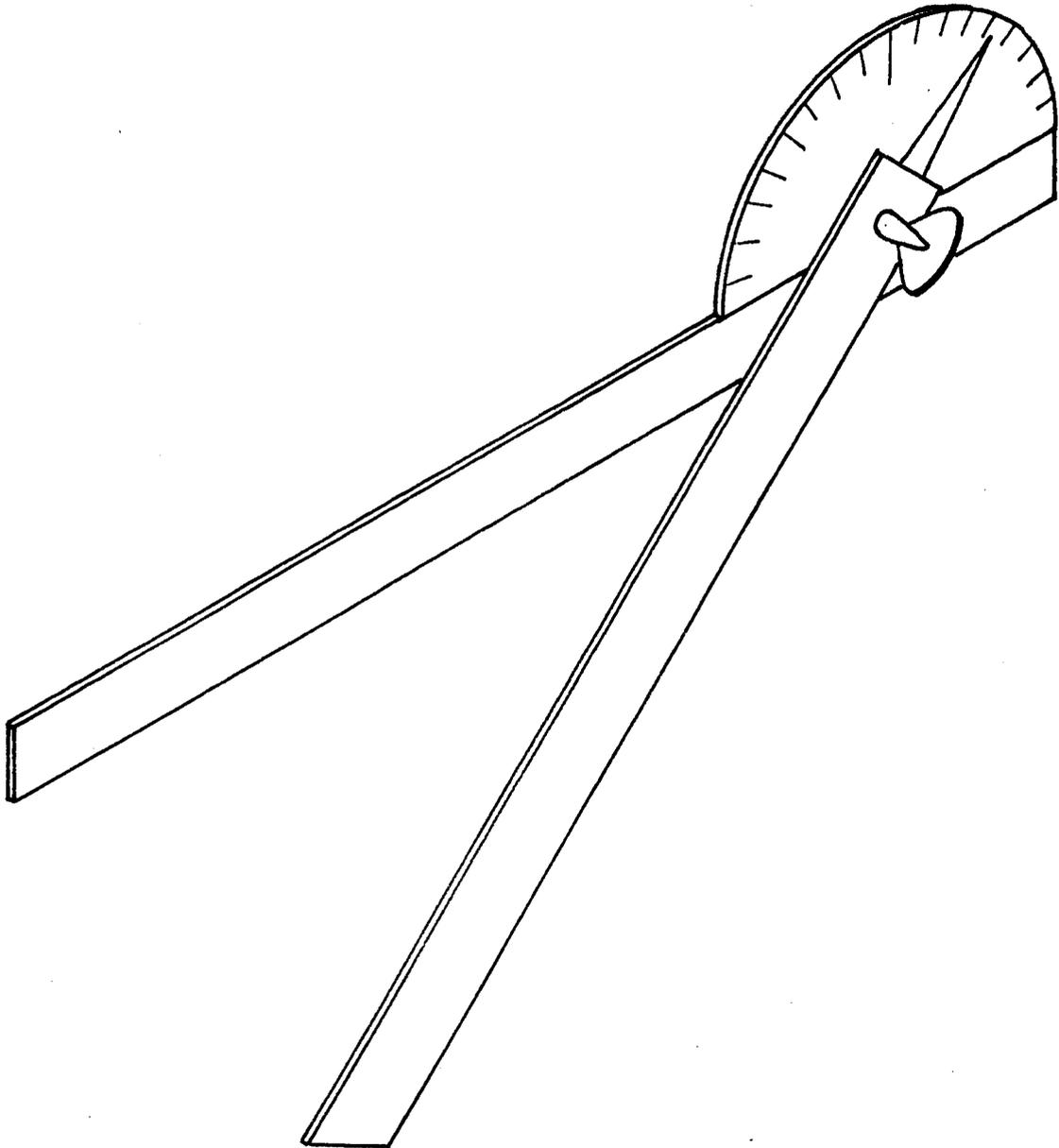
la S_1 con el sondeo, con la orientación que se muestra en dicha figura. Ambas elipses (la del plano S y la de los planos S_1) se cortarán según una línea l, fácilmente identificable en el testigo sobre ambos planos.

Lo más cómodo es medir el ángulo α que forma l con OA (en el sentido de las agujas del reloj, esto es, desde OA hacia OB, con el testigo dispuesto hacia arriba) y el ángulo β que forma el plano S con el eje OC (esto es, con el eje del sondeo); la medida de α se realizó con un simple transportador y la de β con un instrumento que diseñamos y construimos y que se representa en la figura 5. Además, es necesario anotar hacia cual de los cuatro cuadrantes en que queda dividido la elipse de S_1 buza el plano S; esto es, si suponemos que S_1 está dividida en los cuadrantes I (AOB), II, III y IV (designados girando en el sentido de las agujas del reloj), el plano S buza hacia II en el ejemplo de la figura 5.

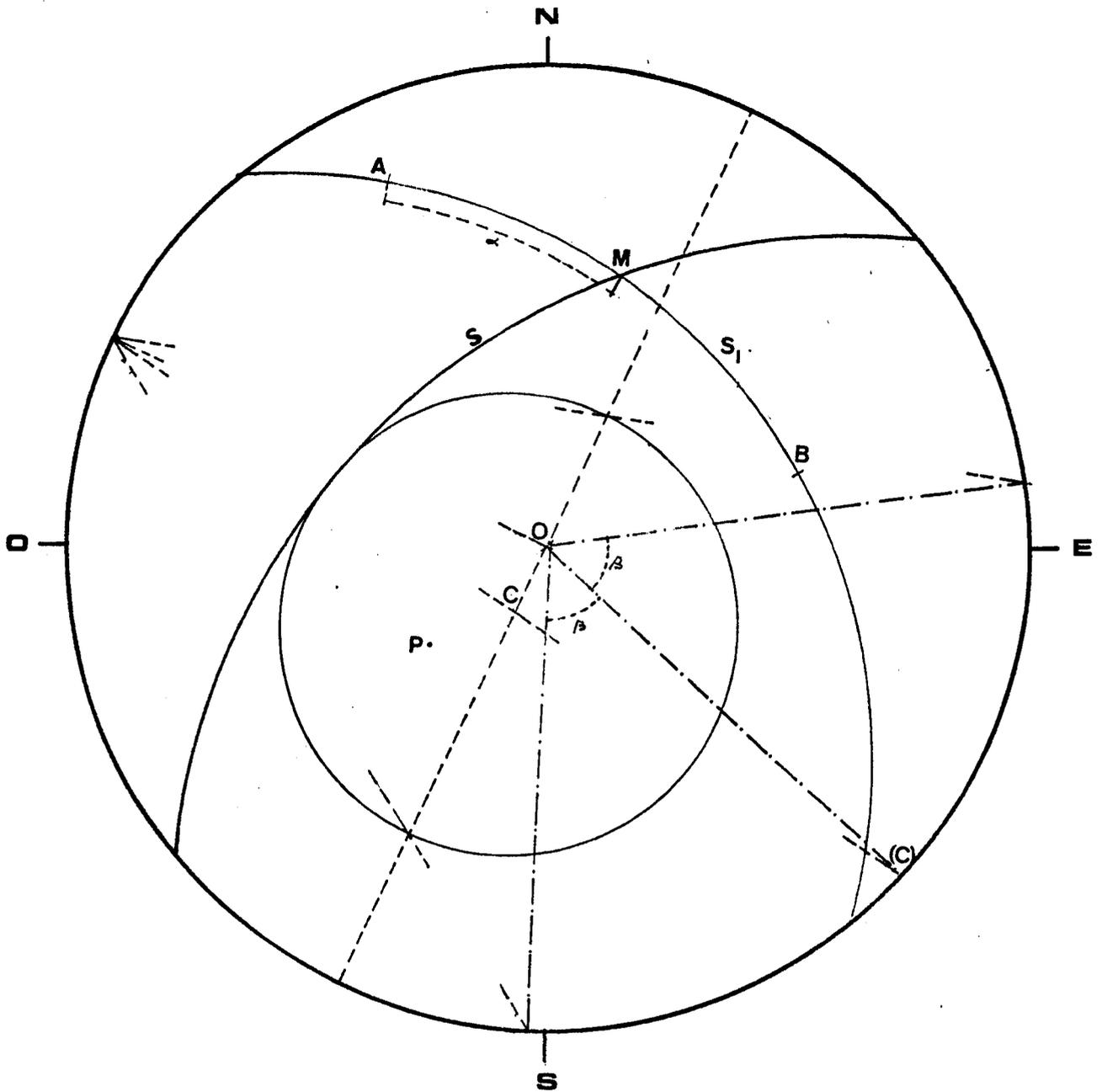
Para obtener la orientación real del plano S es necesario tratar estos datos; lo más rápido para gran número de datos sería resolver analíticamente el problema y hacer un tratamiento por ordenador de los mismos; de hecho, una de las recomendaciones que se hacen en esta memoria (véase el capítulo 6) es precisamente el desarrollo informático del método. Sin embargo, para menor número de datos, el problema puede resolverse de forma sencilla en proyección estereográfica clásica.

Situemos, en primer lugar, el eje del sondeo C y la traza S_1 y polo P del plano de esquistosidad sobre la falsilla de Wulff. El eje OB se localizará sobre la traza de S_1 en su intersección con un plano perpendicular a S_1 que pase por el eje del sondeo, esto es, cuya traza pase por C y por el polo P_1 . El eje OA se situará también sobre la traza de S_1 a 90° de B en sentido contrario a las agujas del reloj.

Supongamos ahora que se han medido $\alpha = 40^\circ$ y $\beta = 50^\circ$ de una diaclasa (u otro plano) S que buza hacia el cuadrante IV. La traza de S pasará



GONIOMETRO PARA TESTIGO DE SONDEO



CONSTRUCCION GEOMETRICA EN PROYECCION ESTEREOGRAFICA PARA OBTENER LA ORIENTACION DE UN PLANO
 S DADOS LOS ANGULOS α Y β (Falsilla de Wulff, hemisferio inferior).

por el punto M, obtenido midiendo, sobre S , 40° desde A (en sentido de las agujas del reloj). Además, S será tangente al cono de revolución de semiángulo cónico β cuyo eje es el del sondeo (esto es, OC); como es sabido, la proyección estereográfica tiene la propiedad de que las circunferencias menores situadas de la esfera se proyectan como circunferencias sobre el plano (PHILIPS, 1975; RAGAN, 1980). El cono antedicho tiene su vértice en el centro de la esfera, y la corta según una circunferencia; la proyección de ésta se obtiene bastante sencillamente abatiendo el plano vertical que contiene al eje del cono OC sobre el plano horizontal, esto es, llevando C a (C), dibujando la sección vertical del cono abatida con semiángulo $\beta=50^\circ$ y deshaciendo el abatimiento, con lo que se obtiene la circunferencia menor de la figura 6 , que es la proyección estereográfica del cono de eje OC y semiángulo cónico β (veáanse las obras antedichas de PHILLIPS y RAGAN para mayor detalle de esta construcción).

Así pues, la traza de S será tangente a esta circunferencia menor y pasará por el punto M, anteriormente obtenido. Girando la falsilla, dibujemos el círculo máximo que pasado por M sea tangente a la circunferencia menor en el cuadrante adecuado al buzamiento del plano que hemos observado en el testigo. (El problema, en general, tiene dos soluciones, por lo que es indispensable dicha observación). Este círculo mayor será la traza del plano que buscamos, cuya orientación real puede medirse ahora con la falsilla. En nuestro ejemplo, la solución es 320/45.

Obtener de esta forma más de unos pocos planos es muy laborioso. Por ello, es más rápido (aunque se pierda cierta precisión) redondear los valores de α y β medidos en el testigo de 5° en 5° (esto es, a 0°, 5°, 10°, 15°,, 90°), dividir la traza S_1 en segmentos de arco de 5° y dibujar las trazas de todas las circunferencias menores correspondientes a conos de eje OC y semiángulos cónicos de 5°, 10°, 15°, etc..... De esta forma, cualquier medida de α y β , redondeado su valor, se introduce inmediatamente en la falsilla y se obtiene de forma rápida la orientación del plano solución.

El problema que se presenta para valores de α tales que hagan que el punto M se proyecte fuera de la circunferencia primitiva (para $\alpha > 160^\circ$ en el ejemplo), se resuelve fácilmente proyectando sobre el hemisferio superior de la esfera.

Por este procedimiento se han trazado todos los datos de diaclasas, fallas (y también de estratificación) que se midieron en el testigo, representándose las orientaciones reales en proyección Lambert (Falsilla de Schmidt), tal como se hizo con los datos de superficie. La comparación de ambos gráficos (figuras 7 y 8) denota ciertas pequeñas diferencias en la orientación y la densidad de las familias de diaclasas. Esto es debido a dos factores:

* La probabilidad de que el sondeo corte una diaclasa subparalela a su eje es muy inferior a la de que corte a una diaclasa subperpendicular a él. Por tanto, el máximo del 10% que se produce en la figura 8 está exagerado con respecto a la distribución espacial real de las diaclasas, en términos probabilísticos.

* Los planos de esquistosidad no se mantienen exactamente paralelos entre sí a lo largo de todo el sondeo, como lo demuestran las medidas del β de la S_1 que se han realizado y que se reflejan en el plano nº 17. Tienen variaciones de hasta 12° , por lo que son de esperar también imprecisiones de esa magnitud en los datos representados en la figura 8.

Con todo, el método se ha mostrado aceptablemente exacto y muy útil para comparar medidas de fracturación de superficie y en sondeos, como se verá más adelante.

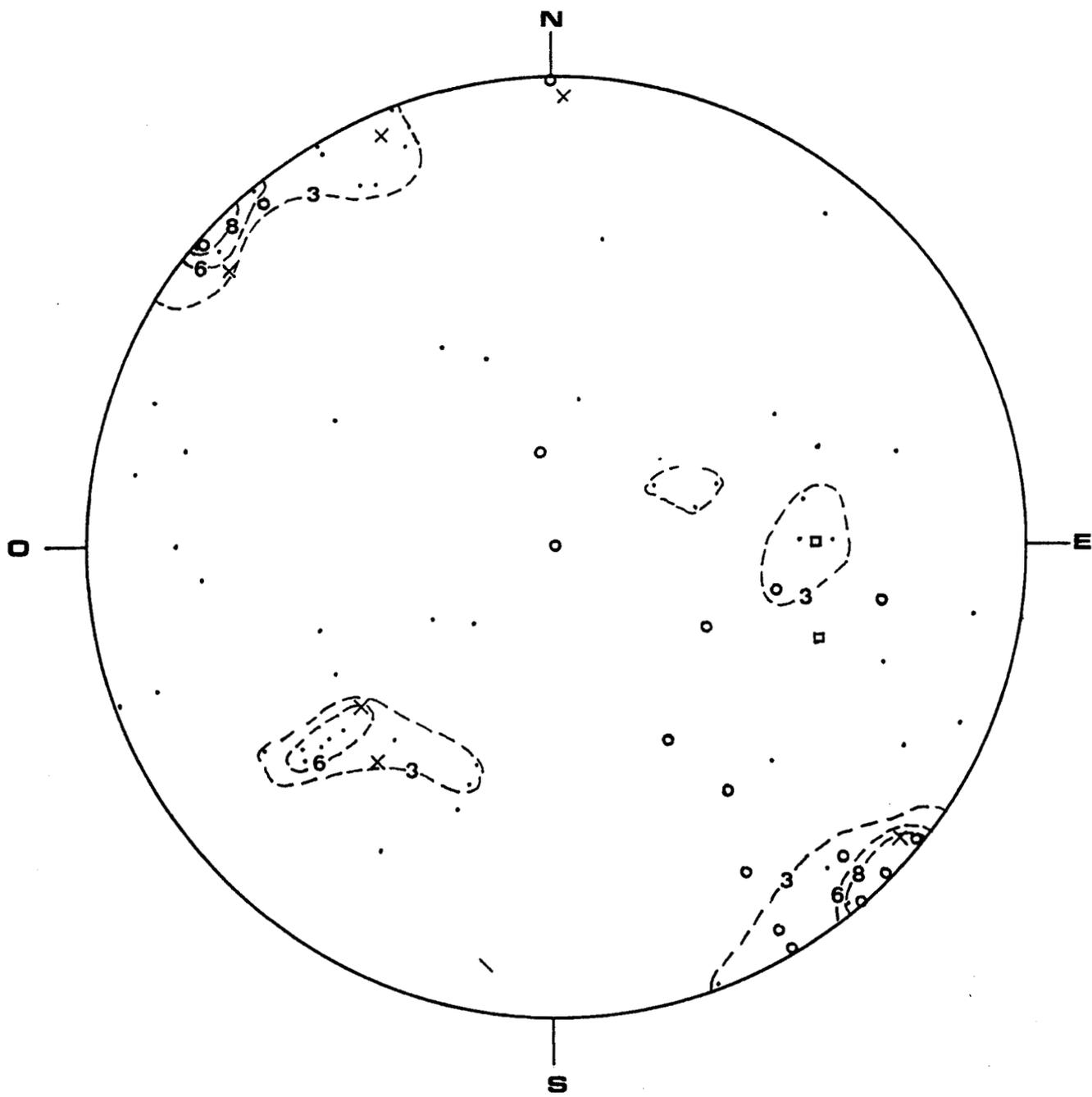
4.3.3. Fallas, diaclasas y otras discontinuidades

Se han agrupado en este apartado aquellas mesoestructuras tectónicas tales como pequeñas fallas, diaclasas, "kink-bands" y crenulaciones tardías (algunas de ellas relacionadas con grandes fallas) que inciden negativamente en la explotabilidad de la masa rocosa y que no han sido tratadas anteriormente.

En la figura 7 se representan en proyección equiareal Lambert los polos de 89 de estas estructuras medidas en toda la zona del estudio. Se observa un máximo principal de diaclasas, fallas y "kink-bands" subverticales y con una dirección NE-SO, aunque dicho máximo tiene bastante dispersión, incluyendo direcciones que van desde N40E a N65E (es decir, oscilan de 130/90 a 155/90). Podría ser en realidad que se tratara de dos máximos cercanos, uno de ellos con dirección N45E y otro con dirección N60E. La memoria de la hoja 485 del MAGNA identifica ambos sistemas.

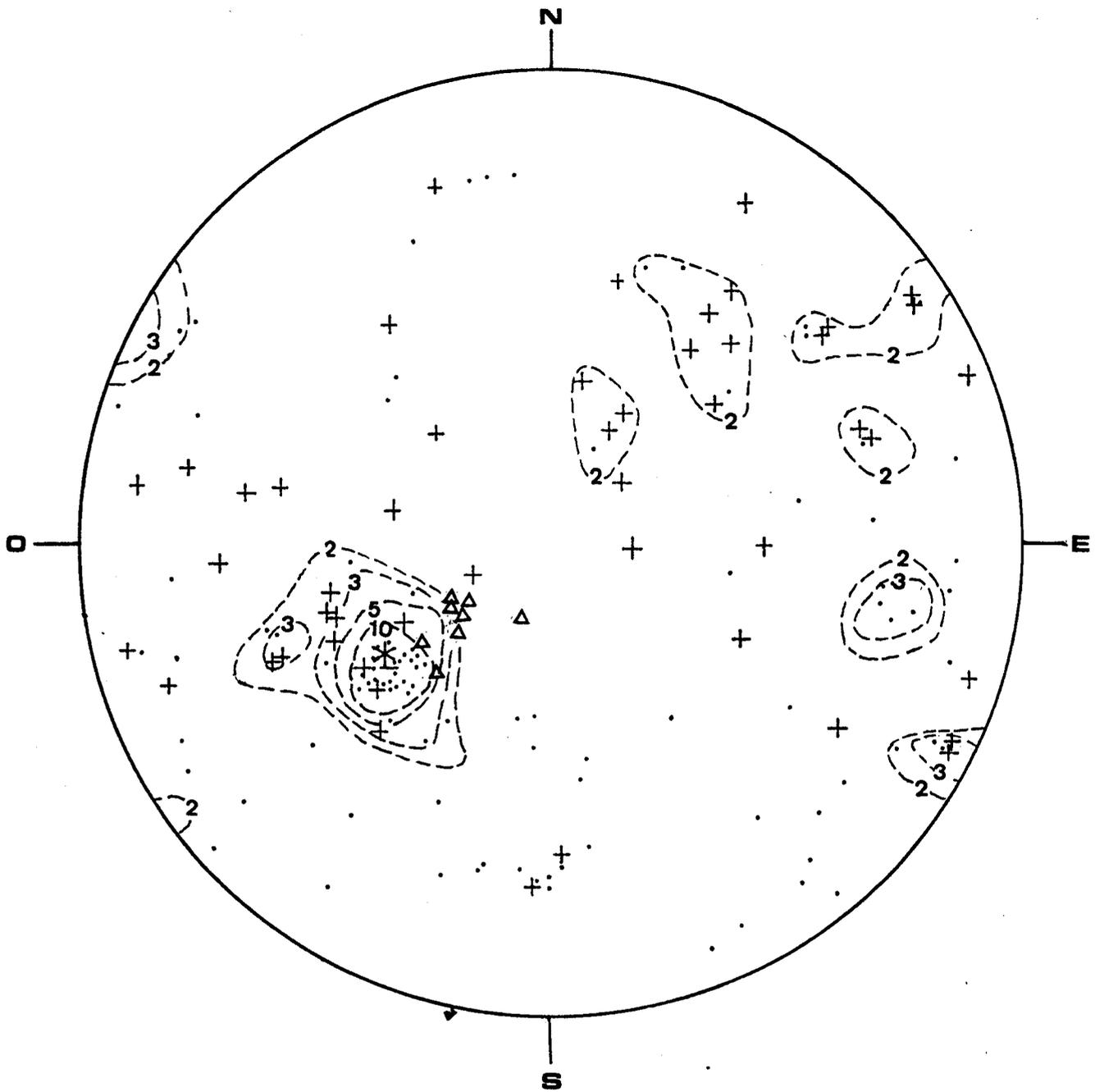
Otro máximo se observa con dirección N140E y buzamiento de unos 55° al NE (o lo que es lo mismo, con orientación 50/55). Este máximo no incluye kink-bands. Por último, se observan otras dos concentraciones de diaclasas a 245/25 y diaclasas, kink-bands y crenulaciones a 270/45. Además, pueden verse diaclasas y kink-bands dispersos por la proyección, pero que no forman máximos con los intervalos de curvas de densidad elegidos.

En la figura 8 se representan en proyección Lambert los polos de 151 diaclasas, de esquistosidad local y 8 medidas de estratificación del sondeo realizado. Con el fin de separar las diaclasas superficiales de las profundas, se han representado con distinto símbolo las medidas realizadas hasta 30 m. de longitud de sondeo (al ser un sondeo inclinado, corresponde a unos 28,7 m. de profundidad) y los realizados a más de esta longitud.



- Diaclasas
- × Fallas
- Kink-bands
- Crenulaciones tardías
- Isolíneas de densidad en %

REPRESENTACION DE LOS DATOS DE 89 ELEMENTOS ESTRUCTURALES TARDIHERGINICOS MEDIDOS EN SUPERFICIE. (Falsilla de Schmidt, hemisferio inferior).



- Δ S_0
- * S_1
- + Diaclasas medidas de 0 a 30 m. de profundidad
- . Diaclasas medidas a más de 30 m. de profundidad
- Isolíneas de densidad de diaclasas en %

REPRESENTACION DE LOS DATOS DE ESTRATIFICACION, ESQUISTOSIDAD Y DE 151 DIACLASAS MEDIDAS EN EL TESTIGO DEL SONDEO (Falsilla de Schmidt, hemisferio inferior).

Se observa un máximo absoluto, de orientación 45/40, muy próxima a la de la esquistosidad (50/35) y a la estratificación (48/28).

Otros máximos importantes corresponden al sistema 120/90 (subvertical) y al 280/60. Las concentraciones de orientaciones 250/30, 235/70, 220/45 y 205/20 parecen corresponder a diaclasas superficiales, ya que predominan en ellas los polos de medidas efectuadas a menos de 30 m. de longitud de sondeo.

La no coincidencia absoluta de las orientaciones de los máximos entre las medidas de superficie y las realizadas en el sondeo puede obedecer a la imprecisión inherente al método de medida de éstas últimas (como ya se comentó en el apartado 4.3.2), aunque también puede ocurrir que las medidas del sondeo, al ser puntuales, obedezcan a una peculiar distribución espacial de las diaclasas que se aparta ligeramente de la tónica regional representada por las medidas de superficie, realizadas en un área mucho más amplia.

Así pues, tenemos dos familias principales de diaclasas, que denominaremos D_1 (orientaciones de 120/90 a 155/90 y buzamientos superiores a 75°) y D_2 (orientaciones de 45/40 a 50/55). Las familias D_3 (270/45 a 280/60) y D_4 (245/25) parecen tener una importancia menor. D_4 podría ser un sistema conjugado con D_2 , ya que ambas forman un diedro de 80°, con el plano de simetría buzando 15° al NE y la recta de intersección entre D_1 y D_2 con ligera inmersión al NO.

Respecto de las diaclasas que hemos considerado superficiales, las denominaremos D'_5 (235/70), D'_6 (220/45), D'_7 (205/20) y D'_8 (250/70). Las familias D'_5 y D'_6 podrían ser conjugados de algunas diaclasas que se encuentran incluidas dentro de D_2 ; en particular, D'_6 puede ser conjugada de las diaclasas superficiales de orientación 50/40 (veáse la figura 6), formando ambas familias un diedro de 85°, con el plano de simetría subvertical; D'_7 puede ser también un sistema conjugado con las diaclasas

superficiales de orientación, 55/35, formando un diedro de 75° , con el plano de simetría subhorizontal.

Otros datos tomados en campo, que no vienen reflejados en las figuras antedichas, son los siguientes:

* Las diaclasas del sistema D_2 suelen tener un relleno de cuarzo de espesor milimétrico, a veces acompañado de pirita en las formaciones pizarrosas. Algunas de ellas presentan evidencia de haber sido planos de deslizamiento (pequeñas fallas), con movimiento sinestro.

* Las diaclasas del sistema D_1 pueden tener (especialmente las muy superficiales) un relleno arcilloso blanquecino de filosilicatos, probablemente del grupo de la pirofilita.

* Las diaclasas que presentan un plano irregular rugoso, son principalmente superficiales.

* La pirita que se encuentra sobre los planos de diaclasa aparece irregularmente sobre casi todas las familias.

* Por las relaciones que se observan entre las diversas familias, deben haberse producido al menos tres fases de formación de diaclasas, siendo la D_2 una de las más antiguas.

* El estudio microscópico de las muestras del sondeo revela que la familia D_2 puede tener su origen en microfallas de salto inverso, subparalelas a la esquistosidad, que van acompañadas de un ligero bandeo tectónico (enriquecimiento en opacos en una banda de décimas de milímetro de anchura sobreimpuesta al plano de deslizamiento), aprovechando quizás como línea de fractura los flancos cortos de micropliegues de 1ª fase, flancos que desaparecen al laminarse completamente durante el deslizamiento (veanse las muestras 399/85-433-GU-LB/181, 399/85-433-GU-LB/183 y 399/85-433-GU-LB/186, Anexo 2).

Respecto de los kink-bands, no son muy frecuentes en la zona de estudio, excepto en determinadas áreas restringidas. Los más frecuentes son los subverticales, más o menos paralelos a las diaclasas de la familia D_1 ,

así como los subhorizontales y los que buzanan al O o al NO. No se han observado kink-bands buzando en otras direcciones.

Análogamente, en algunos puntos se observan crenulaciones tardías (que crenulan a la S_1 e incluso a la S_3) que buzanan al O.

En el testigo del sondeo se han podido medir 151 diaclasas, que no son todas las existentes en él, ya que por defectos de recuperación o de extracción ha habido muchas otras que no se han medido. Ello nos da una elevada densidad de diaclasado, que estimamos del orden de 2,5 a 3 diaclasas por metro (media de los 115 m. de longitud del sondeo), lo que sitúa el macizo rocoso en los límites de la explotabilidad. Afortunadamente, estas diaclasas se concentran en tramos como puede verse en el plano nº 17, dejando otros con menor densidad (2 ó 1 diaclasa por metro), que quizás sean explotables.

De todo lo anterior puede concluirse lo siguiente:

- * Una vez desechadas otras áreas, por diversas razones, en las áreas seleccionadas para investigación ulterior (véase el plano nº 18) el mayor problema lo constituye el diaclasado.
- * De las familias más importantes, las que persisten en profundidad (por debajo de los 30 m.) son el D_1 , el D_2 y el D_3 , estando la superficie mucho más diaclasada.
- * Quizás el sistema más perjudicial (y el más difícil de estudiar) sea el D_2 , dado su paralelismo con la estratificación y la esquistosidad en dichas áreas.

4.4. RESULTADOS DE LA FASE DE INVESTIGACION PREVIA

Todo lo expuesto en el presente capítulo puede sintetizarse en el plano nº 18, que es una selección de áreas para investigación ulterior dentro de las zonas de interés prioritario.

Tomado como base el mapa geológico simplificado de la formación R₄, se han marcado con sobrecargas las áreas con fracturación intensa y con crenulaciones de F₃ y F₄. Además, se han representado con distintos colores las áreas llanas y con la esquistosidad a favor o en contra de la pendiente topográfica.

Ello tiene importancia a la hora de considerar el tipo de explotación, caso de que alguna de ellas resulte tener macizos explotables: cantera en socavón o de ladera, con mucho o poco desmante.

Desechando las zonas intensamente fracturadas o crenuladas, restan tres áreas en las que centran investigaciones más detalladas; las hemos denominado Area del Bornova, Area de La Rodada y Area de Los Prados. En principio, las laderas más favorables serán aquellas en que la esquistosidad buza en el mismo sentido que la inclinación de la misma; sin embargo, así el volumen de roca meteorizada a mover antes de llegar a la roca fresca es mayor, ya que es mayor la superficie expuesta a la alteración en relación al volumen de roca, a una profundidad determinada. En cualquier caso, solo investigaciones detalladas ulteriores permitirán decidir si existen macizos explotables y cual será el método óptimo de explotación.

En síntesis, los resultados de la fase de investigación previa han sido los siguientes:

* Las áreas del Bornova, la Rodada y Los Prados son las más favorables dentro de las zonas de interés prioritario, siendo el resto inexplorable debido a factores tectónicos fundamentalmente.

* En esta fase del trabajo no se han localizado macizos que a priori sean explotables; sin embargo, si se encuentran dentro de las áreas antedichas varios macizos que están cerca del límite de explotabilidad.

* La fracturación disminuye mucho a partir de los 30 m. de profundidad, como ha demostrado el sondeo realizado, existiendo dos tipos de diaclasas: superficiales y regionales. Por ello, el diaclasado es siempre más intenso en superficie.

* Solo investigaciones ulteriores más detalladas, especialmente dirigidas a la evaluación de la fracturación, permitirán decidir la explotabilidad de dichos macizos.

5. MUESTREO Y CARACTERIZACION TECNOLOGICA DE LAS PIZARRAS

5.1. MUESTRAS PARA PETROGRAFIAS

5.1.1. Metodología del muestreo y de las petrografías

Durante el desarrollo de las diferentes fases del trabajo se han recogido un total de 116 muestras de mano de roca, la mayoría de pizarra, de dos diferentes formaciones litológicas investigadas, que se relacionan en la Tabla I.

La finalidad de todas ellas (excepto una) ha sido el cortar láminas delgadas para su posterior observación al microscopio; la muestra restante se tomó para intentar clasificar algunos fósiles que aparecían en el miembro superior de la Formación R₂. Ello exigió tomar casi siempre muestras orientadas, con el fin de poder trasladar al mapa las medidas de estratificación, esquistosidad, etc, que se realizaron en las láminas delgadas.

En algunos casos ha sido preciso cortar más de una lámina delgada por muestra, orientándolas en diferentes planos del espacio, con el fin de reconstruir tridimensionalmente las estructuras que se observan al microscopio.

Se ha trabajado con un microscopio petrográfico triocular NIKON Lobophot-Pol, de luz transmitida, con accesorio de cámara fotográfica. Las microfotografías se han impresionado sobre película KODAK Panatomic-X.

Las fichas petrográficas se incluyen en el Anexo 2 del presente Informe. Como puede verse en ellas se ha descrito sistemáticamente todas las muestras de mano y se ha orientado la o las láminas en la muestra. Las observaciones cubren, como mínimo, los siguientes aspectos: Descripción de la muestra, textura, microestructuras y composición; además, en muchos casos, se ha realizado medidas de ángulos entre estructuras, croquis y fotografías. Por último, se ha clasificado la roca según el estudio microscópico (clasificación que en la mayor parte de los casos coincide con la realizada sobre la muestra de mano, como es lógico).

RELACION DE MUESTRAS

Nº DE MUESTRA	SITUADA EN LOS PLANOS Nº	NATURALEZA	FORMACION
99/85-432-GU-LB/125	1 y 4	Pizarra de grano medio con cloritoide.	R ₂
" LB/126	1 y 4	Pizarra de grano medio	R ₂
" LB/127	1 y 4	Pizarra de grano medio	R ₂
" LB/128	1 y 4	Pizarra de grano medio	R ₂
" LB/129	1 y 4	Pizarra de grano grueso	R ₂
" LB/130	1 y 4	Arenisca con láminas pelíticas.	R ₃
" LB/131	1 y 4	Pizarra de grano medio	R ₄
" LB/132	1 y 4	Pizarra de grano medio	R ₄
99/85-485-M -LB/133	1 y 7	Pizarra de grano medio	R ₂
" LB/134	1 y 7	Pizarra de grano medio	R ₂
99/85-433-GU-LB/144	1 y 9	Limolita arenosa	R ₁
" LB/145	1 y 9	Pizarra de grano grueso	R ₂
" LB/146	1 y 9	Pizarra de grano medio	R ₂
" LB/147	1 y 9	Pizarra clorítica	R ₂
" LB/148	1 y 9	Pizarra de grano medio	R ₂
" LB/149	1 y 9	Pizarra de grano fino	R ₂
" LB/150	1 y 9	Pizarra de grano fino	R ₂
" LB/151	1 y 16	Pizarra de grano medio	R ₄
" LB/152	1 y 11	Pizarra de grano fino	R ₄
" LB/153	1 y 11	Pizarra de grano fino	R ₄
" LB/154	1 y 11	Pizarra de grano fino	R ₄
" LB/155	1 y 15	Pizarra de grano fino	R ₄
" LB/156	1 y 15	Pizarra de grano medio	R ₄
" LB/157	1 y 15	Pizarra de grano fino a medio.	R ₄
" LB/159	1 y 16	Pizarra de grano medio	R ₄
" LB/160	1 y 16	Arenisca	R ₃
" LB/161	1 y 16	Pizarra de grano medio a grueso.	R ₂
" LB/162	1 y 16	Arenisca pelítica	R ₅
" LB/163	1 y 16	Pizarra de grano grueso	R ₅
" LB/164	1 y 16	Pizarra arenosa de grano grueso.	R ₅

TABLA I (Continuación)

Nº DE MUESTRA	SITUADA EN LOS PLANOS Nº	NATURALEZA	FORMACION
399/85-433-GU-LB/165	1 y 16	Pizarra de grano fino con laminaciones arenosas.	R5
" LB/166	1 y 16	Arenisca con cemento calcáreo.	R3(Techo)
" LB/167	1 y 16	Pizarra arenosa	R2
" LB/168	1 y 16	Pizarra arenosa	R2
" LB/169	1 y 11	Pizarra de grano grueso	R3(Basal)
" LB/170	1 y 11	Pizarra de grano grueso	R2
" LB/171	1 y 14	Limolita arenosa	R5
" LB/172	1 y 14	Pizarra de grano muy fino	R4
" LB/173	1 y 14	Pizarra de grano fino	R4
" LB/174	1 y 14	Pizarra de grano fino	R4
" LB/175	1 y 15	Limolita	R5
" LB/176	1 y 15	Pizarra de grano fino a medio.	R4
" LB/177	1 y 14	Arenisca ¿Calcárea?	R3(Techo)
" LB/178	1	Pizarra con cantos de caliza y de cuarzo ("Pelita con fragmentos").	R5(Basal)
" LB/179	1	Pizarra de grano medio	R4
" LB/180	1	Pizarra con laminaciones arenosas.	R4
" LB/181	1	Pizarra de grano fino con escasas laminaciones arenosas.	R4
" LB/182	1	Pizarra de grano fino con muy escasas laminaciones arenosas.	R4
" LB/183	1	Pizarra de grano fino con carbonatos.	R4
" LB/184	1	Pizarra de grano fino	R4
" LB/185	1	Pizarra de grano fino	R4
" LB/186	1	Pizarra de grano muy fino	R4
" LB/187	1	Pizarra de grano muy fino	R4
" LB/188	1	Pizarra de grano fino	R4
" LB/189	1	Pizarra de grano fino a medio.	R4
" LB/190	1	Arenisca con cemento calcáreo.	R3(Techo)

TABLA I (Continuación)

Nº DE MUESTRA	SITUADA EN LOS PLANOS Nº	NATURALEZA	FORMACION
99/85-459-GU-VP/100	1 y 6	Pizarra de grano grueso con cloritoide.	R ₂
" VP/101	1 y 6	Pizarra arenosa	R ₂
" VP/102	1 y 6	Pizarra cuarzosa de grano grueso.	R ₂
" VP/103	1 y 6	Pizarra cuarzosa de grano grueso.	R ₂
" VP/104	1 y 6	Pizarra de grano grueso	R ₂
99/85-485-GU-VP/105	1 y 8	Pizarra limolítica	R ₂
" VP/106	1 y 8	Pizarra de grano grueso	R ₂
" VP/107	1 y 8	Pizarra limolítica	R ₂
" VP/108	1 y 8	Limolita con bioturbación	R ₃
" VP/109	1 y 8	Pizarra de grano grueso	R ₃
" VP/110	1 y 8	Pizarra limolítica	R ₃
" VP/111	1 y 8	Caliza arenosa	R ₃
99/85-432-SG-VP/112	1 y 2	Pizarra de grano medio	R ₃
" VP/113	1 y 2	Pizarra de grano grueso	R ₃
" VP/114	1 y 2	Pizarra granatífera de grano grueso.	R ₂
" VP/115	1 y 2	Arenisca carbonatada	R ₄
" VP/116	1 y 2	Pizarra de grano grueso	R ₄
" VP/117	1 y 3	Pizarra de grano medio	R ₄
" VP/118	1 y 3	Pizarra limolítica	R ₃
" VP/119	1 y 3	Pizarra de grano medio	R ₃
" VP/120	1 y 3	Pizarra de grano medio	R ₃
" VP/121	1 y 3	Pizarra de grano medio	R ₃
" VP/122	1 y 3	Pizarra de grano medio	R ₄
" VP/123	1 y 3	Pizarra ampelítica	R ₄
99/85-433-GU-VP/124	1 y 15	Pizarra de grano medio	R ₄
" VP/125	1 y 15	Pizarra de grano medio con laminaciones.	R ₄
" VP/126	1 y 15	Pizarra de grano fino	R ₄
99/85-434-GU-VP/127	1 y 16	Pizarra de grano medio	R ₄
" VP/128	1 y 16	Pizarra de grano fino	R ₄

TABLA I (Continuación)

Nº DE MUESTRA	SITUADA EN LOS PLANOS Nº	NATURALEZA	FORMACION
99/85-434-GU-VP/129	1 y 16	Pizarra limolítica con laminaciones.	R3
" VP/130	1 y 16	Pizarra de grano fino	R4
" VP/131	1 y 16	Pizarra cuarzosa de grano medio.	R4
" VP/132	1 y 16	Pizarra de grano medio con laminaciones.	R4
" VP/133	1 y 16	Pizarra de grano medio	R2
99/85-433-GU-VP/134	1 y 14	Pizarra de grano medio	R4
" VP/135	1 y 14	Pizarra de grano fino	R4
" VP/136	1 y 14	Pizarra de grano fino	R4
" VP/137	1 y 14	Arenisca con laminaciones pelíticas.	R3
99/85-460-GU-MP/1	1 y 10	Pizarra de grano medio	R1
" MP/2	1 y 10	Pizarra de grano medio	R2
" MP/3	1 y 10	Pizarra de grano grueso	R2
" MP/4	1 y 10	Limolita con laminaciones	R3
" MP/5	1 y 10	Limolita	R3
" MP/6	1 y 10	Pizarra con laminaciones arenosas.	R2
" MP/7	1 y 10	Limolita con laminaciones arenosas.	R2
" MP/8	1 y 10	Pizarra de grano medio	R2
" MP/9	1 y 10	Pizarra fosilífera	R2
" MP/10	1 y 10	Pizarra con laminaciones arenosas.	R2
99/85-432-GU-PM/1	1 y 5	Pizarra de grano medio	R2
99/85-459-GU-PM/2	1 y 5	Pizarra de grano medio	R2
" PM/3	1 y 5	Pizarra de grano medio	R3
" PM/4	1 y 5	Pizarra de grano fino	R2
" PM/5	1 y 5	Pizarra de grano fino	R2
" PM/6	1 y 5	Pizarra clorítica	R2
" PM/7	1 y 5	Pizarra de grano medio	R2
" PM/8	1 y 5	Pizarra fosilífera	R3
" PM/9	1 y 5	Pizarra de grano medio	R2
" PM/10	1 y 5	Pizarra de grano grueso	R2
" PM/11	1 y 5	Pizarra de grano muy grueso.	R2
" PM/12	1 y 5	Pizarra de grano fino	R2

5.1.2. Petrografías

La textura más frecuente en las pizarras es la lepidoblástica. En limolitas y areniscas se encuentran texturas granolepidoblásticas, granoblásticas e incluso granudas.

Las microestructuras que se observaron son variadas: la estratificación se presenta: a) como bandas con diferente composición (pelítica o arenosa) y diferente color (oscuro, claro), que pueden ser paralelas u oblicuas (laminaciones cruzadas) entre sí, y tener estructuras sedimentarias (granoclasificación), b) lentejones, más o menos discontinuos, hecho debido bien a que se tratase, en origen, de una estratificación lenticular o "flaser" o bien a la trasposición de las láminas arenosas por la esquistosidad, c) como leves cambios en el tamaño y la abundancia de los granos de cuarzo en las muestras de pizarra.

La esquistosidad principal suele ser la de primera fase (S_1) se muestra como una esquistosidad continua, lepidoblástica, definida por la orientación de todos los minerales de la roca, especialmente los filosilicatos, y que rodea a los objetos pre-esquistosos (microclastos, cristales de clorita, algunos opacos, etc), dejando sombras de presión de cuarzo a ambos lados de ellos. En las litologías más gruesas (limolitas, areniscas) puede manifestarse como una esquistosidad grosera ("Rough cleavage") o pizarrosidad grosera (caso de areniscas con cemento calcáreo y recristalizadas; véase la muestra 399/85-433-GU-LB/177). En pizarras es siempre una pizarrosidad ("Slaty cleavage"), más o menos penetrativa. Es muy frecuente la presencia de crenulaciones posteriores, de segunda fase (S_2) (véase la muestra 399/85-432-SG-VP/114), tercera fase (S_3) (muestra 399/85-433-GU-LB/145), o cuarta fase (S_4) (muestra 399/85-433-GU-LB/153); estas crenulaciones, si son lo suficientemente intensas, pueden ser auténticas esquistosidades espaciadas de crenulación, o bien bandeado tectónico ("Tectonic banding"), pasando a ser la esquistosidad principal (S_p), esto es, los planos de fisilidad más evidentes de la roca.

La presencia de microclastos de cuarcita, cuarzo y caliza es normal en las formaciones pizarrosas investigadas. Se han encontrado

también en la Formación R-2 unos objetos redondeados Pre-F₁ en cuyo interior se aprecia una alineación de minerales que podrían corresponder a microclastos de rocas esquistosas pre-hercínicas (veáse la muestra 399/85-485-M-LB/134).

La clorita se encuentra usualmente de dos formas: en pequeños cristales de color verde, formando parte de la matriz de las pizarras (y teniendo por tanto, un origen probablemente metamórfico) o bien en forma de fenoblastos que llegan a tener varias décimas de mm de longitud, rodeados por la esquistosidad S₁, y de origen probablemente diagenético. El cloritoide solo se presenta en los flancos del sinclinorio de Majaelayo, en la Formación R₂, y debe corresponder a una zona con grado metamórfico ligeramente más alto que en el resto. Se presenta en cristales tabulares grandes (hasta de varios milímetros), deduciéndose de sus relaciones con las esquistosidades que es pos-F₁ y, probablemente, pre-F₃, (muestra 399/85-459-GU-VP/100). Biotita se encuentra en muy pocas muestras (veáse, por ejemplo, 399/85-433-GU-LB/130); como es sabido, cloritoide y biotita son incompatibles químicamente (WINKLER, 1978), por lo que también este mineral podría corresponder a un grado metamórfico ligeramente mayor.

La mica blanca (sericita-moscovita-illita-fengita) es el componente mayoritario, junto con la clorita y el cuarzo, en las rocas pelíticas. No es posible, por métodos petrográficos, diferenciar entre sus diferentes variedades. Se tratará, probablemente, de una mezcla de micas procedentes del antiguo sedimento, de micas diagenéticas y de micas neoformadas durante las diversas fases del metamorfismo.

La mayoría del cuarzo se presenta en granos detríticos, aunque puede estar recristalizado o neoformado durante el metamorfismo (por ejemplo, los cristales que forman las sombras de presión de los objetos pre-esquistosos). Se han observado algunos granos de cuarzo de formas que parecen golfos de corrosión, cuyo origen podría ser volcánico (esto es, granos de cuarzo procedentes de rocas volcánicas que cayeron en la cuenca de sedimentación ordovícica) (veáse, por ejemplo, la muestra 399/85-460-GU-MP/8).

Los opacos de las pizarras son las piritas, que, en general, son pre-F₁. La pirrotina (determinada por su reacción en frío al ClH diluído) se presenta como agrupados policristalinos o lenticulas irregulares Pos-F₁. La ilmenita aparece en algunas muestras de la Formación R-2, como cristales aciculares, algunos notablemente largos, en general algo alterada a leucoxeno.

Los carbonatos (calcita-dolomita) solo aparecen en algunas muestras de areniscas con cemento esparítico de la mitad superior o el techo de la Formación R₃ (veáse las muestras 399/85-433-GU-LB/166, 399/85-459-GU-VP/111 y 399/85-459-GU-VP/115), relleno de diaclasas y como microclastos en las formaciones R-4 y R-5.

5.1.3. Relación entre la petrografía y la calidad de las pizarras

El análisis de las observaciones petrográficas permite sacar interesantes conclusiones que explican algunos de los factores que influyen en la calidad de la pizarra en la zona abarcada por el estudio:

- * Las únicas pizarras con posibilidades de explotación son las que tienen la S₁ como esquistosidad principal (la que forma los planos de fisilidad natural de la roca).
- * La presencia de esquistosidades o crenulaciones posteriores a la S₁ puede hacer inexplorable pizarras con calidad litológica buena, en principio. Puede decirse que esto ocurre si la crenulación es lo suficientemente intensa para originar esquistosidad espaciada o bandeo tectónico, aunque sean incipientes (Fotografías nº 27).
Mayor desarrollo de estas estructuras puede originar que la esquistosidad principal pase a ser S₂, S₃ ó S₄ no siendo continua, sino espaciada (de 2ª, 3ª ó 4ª fase), con lo que la fisilidad de la pizarra es muy baja (Fotografías nº 15, 17 y 18).

- * La fisilidad de las pizarras depende, más que del tamaño de grano medio de la roca, de su homogeneidad textural. La presencia de microclastos, porfiroblastos, restos de la estratificación, etc., incluso en pequeñas proporciones, impiden que la roca sea hendida con facilidad (Fotografía nº PZ6/16).
- * Sin embargo, las pizarras con buena calidad litológica suelen tener tamaños de grano finos, en general inferiores a $25 \mu\text{m}$ (tamaño medio de los granos de cuarzo de la matriz, medido perpendicularmente a la esquistosidad). Las pizarras de grano medio llegan a $75 \mu\text{m}$ (Fotografía nº 13).
- * Los porfiroblastos de clorita y los microclastos conservan, con mucha frecuencia una orientación pre-esquistosa (posiblemente sedimentaria), que si forman un ángulo alto con la S_1 influye negativamente en la fisilidad, al aumentar la heterogeneidad textural (se forman sombras de presión de mayor tamaño que si dicho ángulo es bajo).
- * Un porcentaje de laminaciones arenosas superior al 20% aproximadamente, de la roca, hace descender mucho la calidad de la pizarra. Por encima del 30% prácticamente se hace inexplorable. Las pizarras con laminaciones pueden presentar problemas al labrarlas, ya que la S_1 se refracta al atravesar las láminas de S_0 , por lo que la roca se hiende con superficies escalonadas en vez de planas. Esto es tanto más acusado cuanto mayor sea el ángulo entre S_0 y S_1 .
- * La composición mineralogía de la roca influye también en su fisilidad y propiedades mecánicas. Puede decirse que si la relación del contenido de filosilicatos con respecto al contenido en cuarzo es inferior aproximadamente al 65%, la roca es inexplorable como pizarra para cubiertas, aunque tiene aún aplicación como pizarra para solados, recubrimientos y otros usos.
- * El contenido en carbonatos aunque sea en forma de microclastos disminuye la calidad de la roca al aumentar su alterabilidad. Esto ocurre, por ejemplo con la Formación R_5 (inexplorable).

- * Las pizarras con cloritoide de la Formación R₂ en la zona investigada, presenta una fisilidad muy baja debido quizás a que tienen un grado metamórfico ligeramente más alto que las demás. En general, todas las pizarras de esta formación son inexplotables debido a la heterogeneidad textural que supone la presencia de abundantes porfiroblastos de clorita, ilmenita, etc... (Fotografía nº 9 y nº 12).
- * Los opacos que se presentan en agregados policristalinos, lentejones o con formas irregulares son más oxidables que aquellos que lo hacen con formas cúbicas bien cristalizadas. Ello debe obedecer a que los segundos suelen corresponder a pirita (FeS₂), menos alterable que otros sulfuros de hierro (pirrotina, marcasita) cuya composición química subsaturada en Fe y su estructura cristalina los hacen más inestables ante los agentes atmosféricos. La presencia de ilmenita parece que no influye en este factor.

5.2. MUESTRAS PARA ENSAYOS TECNOLOGICOS

5.2.1. Metodología del muestreo y de los ensayos.

Las muestras para ensayos se tomaron, una vez delimitadas, en las zonas de interés prioritario, concretamente en diversos puntos de la zona Bornova-Rodada. Con el fin de que los ensayos arrojen resultados fiables se ha de procomformar bloques de roca fresca, a la mayor profundidad posible. Esto se logró tomando las muestras en tres puntos concretos (veáse el plano nº 15) donde existen pequeñas labores mineras antiguas, cuyos frentes y escombreras presentan la roca mucho más fresca que los afloramientos cercanos. Estos tres puntos son:

* Cantera de La Rodada.

Las muestras de esta zona se tomaron, en su mayor parte, de las escombreras de una explotación de Pizarras para techar en la ladera norte del monte RODADA, a unos 1.200 m de altitud. De aquí, se tomaron 4 bloques de distintas formas y tamaños. Estos bloques eran mas o menos frescos y presentaban pocos síntomas de alteración por lo que se dieron como válidos en el muestreo.

También fueron tomadas placas rectangulares de 32x22 y 17x18 de la nave de labrado donde eran trabajadas las pizarras de esta explotación

Las muestras de esta zona se marcaron con Ref: 399/85-460-GU-RU/100.

* Canteras del Bornova.

Las muestras fueron tomadas de una de las muchas calicatas que existían en esta zona y de la escombrera que se encontraba al lado, a unos 1.147 m de altitud. Se tomaron 6 bloques de distintos tamaños que no presentaban síntomas de alteración superficial, si bien algunos estaban afectados por pequeñas diaclasas.

También de esta zona de estudio se tomaron muestras de mano siguiendo una línea aproximadamente normal a las estructuras en superficie. En su mayoría fueron tomadas de los frentes de las calicatas con el fin de que no estuvieran afectadas por la alteración superficial. Estas

muestras seran destinadas al ensayo de RESISTENCIA AL CAMBIO TERMICO según UNE 22.197.

Las muestras escogidas de esta zona fueron marcadas con la Ref. 399/85-433-GU-RU-200.

* Calicatas de Naharros.

Las muestras fueron tomadas de las calicatas al O. del pueblo de Naharros, a unos 1.050 m. de altitud. Se escogieron 5 bloques de distintos tamaños sin o con pocos síntomas de alteración superficial.

El acceso hasta estas calicatas es malo, teniendo que vadear el río Cañamares.

Las muestras de esta zona llevan la Ref. 399/85-460-GU-RU-300.

Todos los bloques fueron serrados con forma prismática y exfoliados por operarios especialistas, resultando losas y placas gruesas que posteriormente fueron sometidas a los ensayos correspondientes, habiendo sido previamente distribuidas al azar en cada uno de los ensayos.

Las normas UNE definen exactamente el método de ensayo de las pizarras, por lo que no insistiremos en este punto, remitiendo al lector a dichas normas, cuya relación puede encontrarse en el apartado 7 (Bibliografía) del presente informe.

En el Anexo 2 se incluyen las fichas de ensayos, detallándose los resultados obtenidos en cada una de las muestras y la caracterización tecnológica de los lotes.

5.2.2. Caracterización tecnológica

A la vista de los resultados de los ensayos, se enumeran a continuación una serie de observaciones que abarcan algunos aspectos generales de todas ellas:

* Del ensayo de Absorción se deduce que tienen gran capacidad de retención de agua. En algunos casos se supera el 3% que se indica en la norma por la cual se rige este ensayo.

* No se observan alteraciones importantes tras el ensayo de heladicidad respecto a la integridad de las muestras. Sin embargo, el contacto con el agua da lugar a manchas superficiales de forma redondeada, de color ocre o blanquecino, en cuyo centro siempre se encuentra una inclusión metálica.

* Después del ensayo de Cambios Térmicos se observó que aparecieron manchas de oxidación, unas mas afectando a algunas inclusiones y otras cubriendo zonas dispersas de las muestras.

A este tipo de alteraciones les acompaña a veces una ligera decoloración de las muestras destacando las limaciones existentes en la pizarra.

* Tras la prueba del ácido, todas las muestras sufren una pérdida importante del color, así como descomposición del material por pérdidas de escamas y oxidación de metálicos.

* La mayoría de las muestras ensayadas a flexión dan como resultados módulos de rotura inferior a 290 Kg/cm^2 .

De todas estas observaciones se sacan en conclusión los siguientes puntos:

* Son pizarras facilmente alterables por efecto de la intemperie sobre todo en climas húmedos.

* Debido a la alterabilidad de estas pizarras por efecto del ácido, es conveniente evitar su uso en ambientes contaminados para que no sean atacadas por efectos de fases sulfurosas o lluvias ácidas.

* La alteración por cambios bruscos de temperatura y ambientes contaminados afectan a la estética del material.

* Todas las alteraciones y principalmente las producidas por la contaminación atmosférica tienen gran incidencia en la resistencia a los esfuerzos mecánicos, que queda considerablemente reducida.

* Teniendo en cuenta que las condiciones a que se someten las muestras durante los ensayos son mas duras, que las condiciones a que estan sometidas en realidad cuando las pizarras son utilizadas en cubiertas exteriores, de la observación de los resultados se pueden clasificar en el apartado PAI (Pizarras para ambientes intermedios). Su uso se recomienda en las condiciones mas favorables que sean posible en cuanto a humedad y contaminación atmosférica se refiere.

5.2.3. Relación entre las características tecnológicas y geológicas de la capa potencialmente explotable.

La incidencia de los factores petrográficos sobre las características tecnológicas de las pizarras ha sido ya, en parte, expuesta en el apartado 5.1.3.; existen sin embargo, muchos otros factores geológicos, que se relacionan intimamente con ellas.

Los planos nº 13 y 15, ponen en evidencia que las muestras para ensayos tecnológicos se tomaron en diferentes capas dentro de la Formación R₄, y en distinta posición estructural.

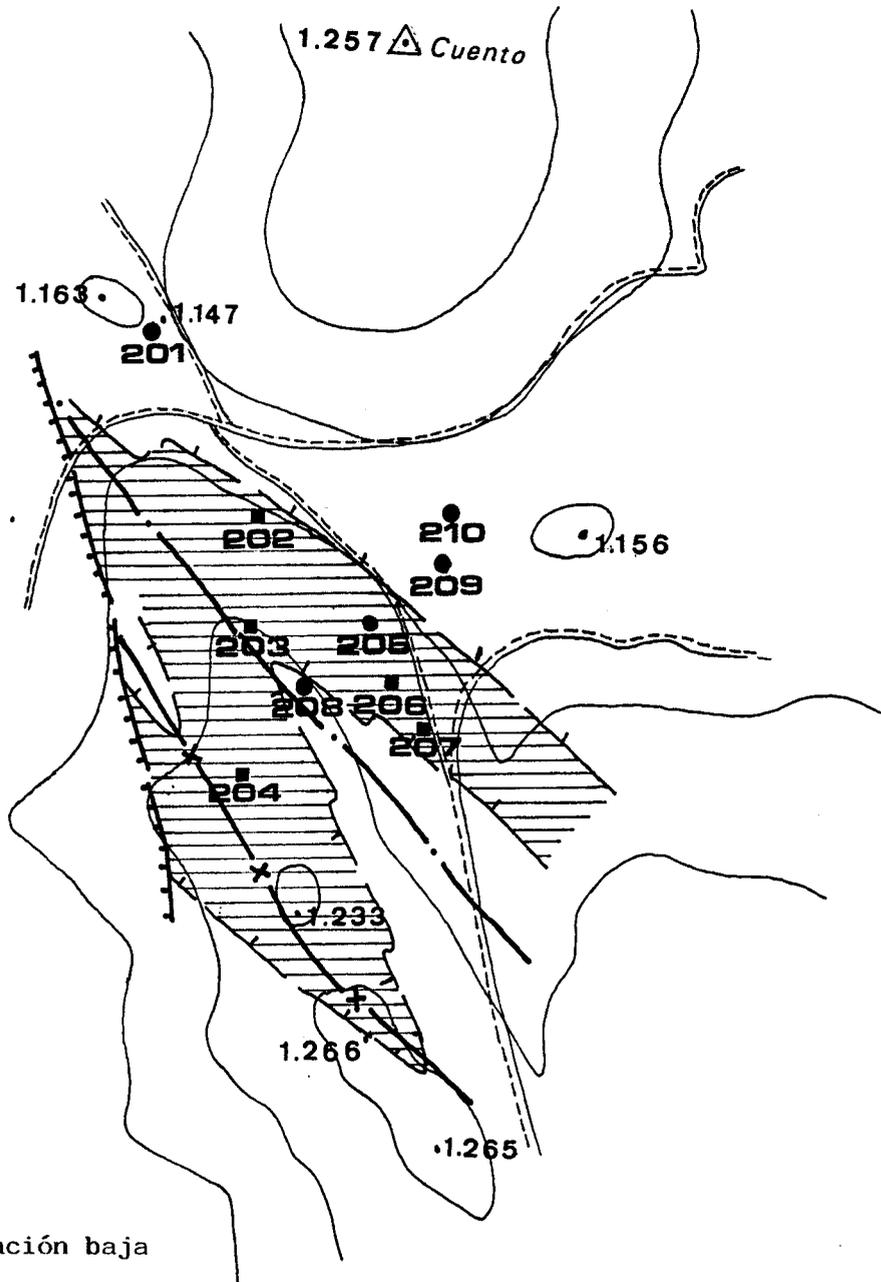
Las muestras 399/85-460-GU-RU/100 se tomaron en la cantera de La Rodada, una capa situada aproximadamente a la mitad de la columna litológica de la formación. Sin embargo, como el avance de la cantera se realizó en dirección perpendicular a la de las capas, pueden haberse tomado a distintas alturas dentro de ella, con una variación máxima de unos 30 m. La posición estructural de la capa es la de flanco inverso basculado (aparentemente, flanco normal, veáse el apartado 4.1.1), con un suave buzamiento de la estratificación hacia el NE, y un buzamiento mayor (40º) de la esquistosidad S₁ (Corte D-D', plano nº 15). Un poco más al NE pasa una banda de deformación de 3ª fase, de tal intensidad que la esquistosidad principal allí es la S₃ y es difícil reconocer en el campo la S₁.

* Las lineaciones que se observan sobre las placas elaboradas y las losas extraídas de estas muestras (veáse el Anexo 2, A.2.2) serán debidas, con toda probabilidad, a una crenulación suave de 3ª fase, marginal de la banda de deformación ya mencionada. Los minerales metálicos (pirita) de pequeño tamaño y dispersos son característicos del tramo medio de la Formación R_4 (veáse el plano nº 17). Ello explica las manchas de oxidación que aparecen en el ensayo de cambio térmico. Los microclastos de caliza, también abundantes en este tramo de R_4 , son la causa de la aparición de manchas blancas festoneadas en el ensayo de heladicidad, y de las manchas y la descamación que produce el ensayo de resistencia al ácido.

El bajo ángulo que la S_0 y la S_1 impide que se manifieste claramente la lineación de intersección entre ambas, lo que es un factor favorable de cara a la calidad.

Las muestras 399/85-433-GU-RU/200 fueron tomadas en un área mas amplia (canteras del Bornova) y con mayor complejidad estructural (veáse el corte C-C', plano nº 15). Abarcan practicamente los dos tercios inferiores de la columna litoestratigráfica. Las muestras situadas más altas en ella son la 201 y 210, estando algo más abajo la 209. Practicamente en la misma capa deben estar los 202, 203, 204, 205, 206 y 207, al estar en una estructura anticlinal-sinclinal que hace que la capa aflore en un área amplia, adaptándose la topografía a la estructura tectónica. Según eso, la muestra 204 estaría en un flanco normal basculado, las muestras 203 y 208 en una charnela de anticlinal; el resto, estarían en flanco inverso basculado. La muestra mas baja en la columna, al aflorar en un núcleo anticlinal, mas probablemente la 208.

* Estos datos se relacionan perfectamente con lo observado en los ensayos de alterabilidad al cambio térmico. Las muestras que mas se alteran son las 202, 203, 204, 206 y 207, que hemos considerado de la misma capa. Las capas situadas por encima (muestras 201, 209 y 210) y por debajo (muestra 208) muestran menor alteración para el ensayo. La figura 8 ilustra este hecho. Unicamente la muestra 205, situado teórica-



- Muestras con alteración baja
- Muestras con alteración media
- ≡≡≡ Afloramiento de la capa alterable
- Trazas teóricas del techo y el muro de la capa alterable
- Falla
- Trazas axiales anticlinales de 1ª fase
- x— Trazas axiales sinclinales de 1ª fase

CROQUIS INTERPRETATIVO DE LOS DATOS DE ALTERABILIDAD DE LAS MUESTRAS DE PIZARRA EN LAS CANTERAS DEL BORNOVA.

mente dentro de la capa alterable, no parece haber sufrido con el ensayo de cambio térmico, pero ello puede ser debido a que esté situada dentro de un delgado nivel no alterable dentro de la capa.

Las muestras 399/85-460-GU-RU/300 se tomaron en las calicatas cercanas al pueblo de Naharros. Su posición en la columna litológica es bastante baja, en el tercio inferior de la misma. La estructura allí es simple, siendo de flanco inverso basculado, con la estratificación buzando unos 30° al NO y la esquistosidad de 35° a 45° en la misma dirección. En la zona aparece una banda de deformación de 4ª fase, por zonas bastante intensa, que buza unos 50° al ONO, y que crenula la esquistosidad S₁.

* Los resultados obtenidos en los ensayos muestran que las placas poseen una superficie rugosa e irregular, debido a la intersección de la S₁ con la crenulación de 4ª fase. La alterabilidad de las muestras al cambio térmico no es muy alta (lo que las correlaciona posiblemente con la muestra 208, anteriormente mencionada, y que también está en una posición baja en la columna litológica). Sin embargo, si son fuertemente alteradas en los ensayos de heladicidad y de resistencia al ácido, lo que coincide con la presencia frecuente de microclastos de caliza en la parte baja de la Formación R₄ y de areniscas calcáreas en el techo de R₃ (véase las muestras 399/85-433-GU-LB/188; 399/85-433-GU-LB/189 y 399/85-433-GU-LB/190).

6. RECOMENDACIONES

De lo expuesto a lo largo de todo este Informe, especialmente en los apartados 3.3, 4.4 y 5.2.2., se deducen una serie de recomendaciones que se han de tener en cuenta a la hora de proseguir la investigación. Son éstas las siguientes:

* Los trabajos posteriores han de centrarse en las tres áreas seleccionadas (Plano nº 18), en las que se realizará una cartografía geológica de detalle (escala 1:5.000 o mayor).

* Sobre dicha cartografía se marcarán las bandas de deformación de S_3 , S_4 y S_5 , siempre que su intensidad sea tal que limite o impida el aprovechamiento de la pizarra, desechándose los macizos rocosos afectados.

* En los macizos restantes se realizará un estudio detallado de la fracturación, midiendo la densidad de cada una de las familias presentes. Se recomienda utilizar fotografías desde distintos ángulos, marcando en ellas las diaclasas y correlacionando las densidades resultantes con las medidas de campo.

* Se prestará especial atención a las diaclasas de la familia D_2 , que tienen una orientación parecida a la de la S_0 y S_1 y son, por tanto, difíciles de detectar. Se intentará resolver el problema de su génesis y correlación o no con los diques de cuarzo, asociados a bandas de deformación, de orientación semejante, y con las microfracturas inversas observadas en lámina delgada.

* Se perforaran sondeos con recuperación de testigo continuo en los macizos que presenten menor densidad de diaclasado. La perforación será, en general, perpendicular a la estratificación y procurando que corte a las principales familias de diaclasas. Sobre el testigo se estudiará la calidad litológica de la roca y la fracturación.

* Se desarrollará un modelo analítico o trigonométrico para realizar el tratamiento informático de los datos de fracturación, con la creación del correspondiente programa, que incluirá la obtención de la orientación real de planos medidos sobre el testigo de sondeos inclinados.

* En base a los datos litológicos y al uso de láminas delgadas orientadas de muestras superficiales y testigos de sondeo, se separaran, si es posible, capas dentro de la Formación R₄, especialmente distinguibles por su contenido en minerales metálicos oxidables, correlacionándose estas capas con la caracterización tecnológica de las pizarras realizadas en el presente trabajo.

* Caso de resultar potencialmente explotable algun macizo rocoso, la decisión final deberá tener en cuenta factores socioeconómicos que exigirán un estudio aparte, dirigido a la evaluación de parámetros económico-mineros, de mercado y sociológicos.

7. BIBLIOGRAFIA

- * ADELL, F. GONZALEZ LODEIRO, F. TENA DAVILA, F. 1978 a.- Sigüenza (461). Mapa Geológico de España e. 1:50.000. IGME.
- * " 1978 b.- Barahona (434). Mapa Geológico de España e. 1:50.000. IGME.
- * APARICIO, A. GALAN, E. 1980.- Las características del metamorfismo hercínico de bajo y muy bajo grado en el sector oriental del Sistema Central (provincia de Guadalajara). Est. Geol, 36, pp.75-84.
- * ARENAS, R. CASQUET, C. PEINADO, M. 1980.- El metamorfismo del sector de Riaza (Somosierra, Sistema Central español). Implicaciones geoquímicas y petrológicas. Cuad. Lab. Xeol. Laxe, 1. pp. 117-146. Inst. Est. Gal.
- * ARENAS, R. GONZALEZ LODEIRO, F. PEINADO, M. 1982.- La zona de cizalla de Berzosa-Riaza en el sector septentrional. Influencia sobre la configuración de las zonas metamórficas. Cuad. Lab. Xeol. Laxe, 3, pp. 123-161. Inst. Est. Gal.
- * BASCONES, L. GONZALEZ LODEIRO, F. MARTINEZ, F. 1978.- Atienza (433). Mapa Geológico de España e. 1:50.000. IGME.
- * " 1980.- Hiendelaencina (460). Mapa Geológico de España e. 1:50.000. IGME.
- * BARROS, J.C. HACAR, M.P. LOMBARDERO, M. & OLMO SANZ, A. del. (en prensa).- Metodología de investigación de los yacimientos de pizarras para cubiertas. Cuad. Lab. Xeol. Laxe. Inst. Est. Gal.
- * BATES, R.L. & JACKSON, J.A. 1980.- Glossary of Geology. Am. Geol. Inst. 751 pp.
- * BELLIDO, F. CAPOTE, R. CASQUET, C. FUSTER, J.M. NAVIDAD, M. PEINADO, M. VILLASECA, C. 1981.- Caracteres generales del cinturón hercínico en el sector oriental del Sistema Central español. Cuad. Geol. Iber., V.7. pp. 15-51.
- * BISCHOFF, L. SCHAFFER, G. SCHMIOT, N. & WALTER, R. 1973.- Zur geologie der mittleren Sierra de Guadarrama (Zentralspanien). Münster Forch. Geol. Paläont., 28, 27 pp.
- * BISCHOFF, H. GURSKY, J. & WILLNER, A.P. 1980.- Tidal sedimentation in the transgressive cycle of the lower ordovician in the eastern Sierra de Guadarrama (Central Spain). Est. Geol. 366, pp. 221-229.
- * CAPOTE, R. CASQUET, C. FERNANDEZ-CASALS, M.J. 1981.- La tectónica hercínica de cabalgamiento en el Sistema Central español. Cuad. Geol. Iber. V.7. pp. 455-469.
- * " 1982.- Los grandes complejos estructurales del Sistema Central: Modelo de evolución tectonometamórfica. Rev. Real Ac. Cien. Exac. Fis. Nat. T. 76, 2. pp. 313-331.
- * FERNANDEZ CASALS, M.J. & GUTIERREZ MARCO, J.C. (en prensa).- Aspectos estratigráficos de la Cadena Hercínica en el Sistema Central. Rev. Real. Ac. Cienc. Ex. Fis. Nat.
- * FORTUIN, A.R. 1984.- Late ordovician glaciomarine deposits (Orea Shale) in the Sierra de Albarracín (Spain). Paleogeogr. Paleoclimat. Paleoecol. 48. pp. 245-261.
- * GIL TOJA, A. JIMENEZ ONTIVEROS, P. & SEARA, J.R. 1985.- La cuarta fase de deformación hercínica en la zona centroibérica del Macizo Hespérico. Cuad. Lab. Xeol. Laxe, 9. pp. 91-104. Inst. Est. Gal.
- * GONZALEZ LODEIRO, F. 1981 a.- Posición de las series infraordovícicas en el extremo oriental del Sistema Central. Cuad. Lab. Xeol. Laxe, 2, pp. 125-134. Inst. Est. Gal.

- * GONZALEZ LODEIRO, F. 1981 b.- Estudio geológico estructural de la terminación oriental de la Sierra de Guadarrama (Sistema Central español). Tesis doc. univ. Sal. (Inédito)
- * GUTIERREZ MARCO, J.C. RABANO, I. PRIETO NOGUEIRA, M. 1984.- Nuevos hallazgos de fósiles en las pizarras ordovícicas de la vertiente meridional de Somosierra (Sistema Central). I. Congr. Esp. Geol., T. III, pp. 127-137.
- * HAFENRICHTER, M. 1980.- The lower and upper boundary of the Ordovician System of some selected regions (Celtiberia, Eastern Sierra Morena) in Spain. Part II: The ordovician/Silurium boundary in Spain. N. Jahrb. Geol. Paläont. Abh., 160 (1). pp. 138-148.
- * HAMMAN, W. ROBARDET, M. & ROMANO, M. 1982.- The Ordovician System in SW. Europe (France Spain and Portugal). Correlation chart and explicatory notes. IUGS publ., 11, 47 pp.
- * IGME. Valdepeñas de la Sierra (485). Mapa Geológico de España. e. 1:50.000 (Inédito).
- * IRANOR 1985.- Normas UNE para Pizarras ornamentales, nº 22.190, 22.191, 22.192, 22.193, 22.194, 22.195, 22.196, 22.197, 22.198, 22.199, 22.200 y 22.201. Inst. Rac. Norm.
- * Le CORRE, C. 1970.- Bases Methodologiques pour la recherche ardoisiere dans le Massif Armoricaín. Bull. Soc. Géol. Minéral. Bretagne, II, 2, pp. 73-87.
- * LOPEZ RUIZ, J. APARICIO, A. GARCIA CACHO, L. 1975.- El metamorfismo de la Sierra de Guadarrama, Sistema Central español. Mem. Inst. Geol. Min. Esp. T. 86, 127 pp.
- * MARCOS, A. 1973.- Las series del Paleozoico Inferior y la estructura hercíniana del occidente de Asturias (NO de España). Trab. Geol. 6, 113 pp.
- * MARTINEZ CATALAN, J.R. 1985.- Estratigrafía y estructura del Domo de Lugo. Corp. Geol. Gallec. Lab. Xeol. Laxe. Inst. Est. Gal.
- * PEREZ ESTAUN, A. 1978.- Estratigrafía y estructura de la rama Sur de la Zona Asturoccidental-Leonesa (NO de España). Mem. Inst. Geol. Min. Esp. T. 92.
- * PHILLIPS, F.-L. 1975.- La aplicación de la proyección estereográfica en geología estructural. Ed. Blume, 132 pp.
- * PRICE, N.J. 1966.- Fault and joint development in brittle and semi-brittle rock. Pergamon Press, 176 pp.
- * RABU, D. & CASTAING, G. 1981.- Apportes de la geologie a la recherche et a l'exploitation des pierres de taille (Roches ornamentales et de construction). Bol. B.R.G.M. Sec. III. nº 1. pp. 81-97.
- * RAGAN, D.M. 1980.- Geologia estructural. Ed. Omega, 207 pp.
- * SCHÄFER, G. 1969.- Geologia und Petrographie in östlichen Kastilischen Hauptschei-degebirge (Sierra de Guadarrama, Spanien). Münster Forsch. Geol. Paläont., 10, pp. 1-207.
- * SOERS, E. 1972.- Stratigraphie et geologie structurale de la partie orientale de la Sierra de Guadarrama (Espagne centrale). Stvd. Geol. Sal. IV. pp. 7-94.
- * SOMMER, W. 1965.- Stratigraphie und tektonik im östlichen Guadarrama-Gebirge (Spanien). Münster. Forsh. Geol. Paläont. 1, pp. 1-59.
- * VICENTE, G. de & UBANELL, A.G. 1983.- Cinemática de la deformación producida por la falla tardihercínica de Almiruete. Sierra de Robledal. Guadalajara (Sistema Central español). Stvd. Geol. Sal. 18, pp. 125-138.
- * WINKLER, H.G.F. 1978.- Petrogénesis de rocas metamórficas. Ed. Blume, 346 pp.