

serie NOVA TERRA

nº 16
O CASTRO 2000

**PETROLOGÍA DE LA UNIDAD ECLOGÍTICA
DEL COMPLEJO DE CABO ORTEGAL
(NW DE ESPAÑA)**

Miren S. Mendía Branguren



LABORATORIO XEOLOXICO DE LAXE

serie / NOVA TERRA

**PETROLOGÍA DE LA UNIDAD
ECLOGÍTICA DEL COMPLEJO DE
CABO ORTEGAL (NW DE ESPAÑA)**

Miren S. Mendia Aranguren

AREA DE XEOLOXIA E MINERIA DO SEMINARIO DE ESTUDOS GALEGOS

O CASTRO 2000



EDICIÓ DO CASTRO

Sada - A Coruña

ISBN: 84-7492-980-6

Depósito Legal: C - 1.597 - 2000

Gráficas do Castro/Moret, S. L.

O Castro. Sada. A Coruña. 2000

Foto de la cubierta: Eclogita con distena de grano grueso y policristales de piroxeno

Foto: Miren Mendía

Diseño de la portada: Juan Ouro

Maquetación: Miren Mendía

FICHA DE CATALOGACIÓN

MENDIA ARANGUREN, Miren S.

Petrología de la unidad eclogítica del complejo de Cabo Ortegal (NW de España). -- A Coruña: Laboratorio Xeolóxico de Laxe. Area de Xeoloxía e Minería do Seminario de Estudos Galegos, 2000.

438 p.: 35 tabl.; 56 Fig.; 24 cms. -- (Serie Nova Terra; 16).

Tesis Doctoral Univ. País Vasco. -- Bibliografía: 315-336.

Índice

ISBN: 84-7492-

1. eclogita-Galicia, 2. Complejo Cabo Ortegal-Galicia 3. evolución tectonotérmica-Galicia, 4. MORB-Galicia, 5.

DATOS DE LA TESIS

Autor: Miren S. Mendiá Aranguren

Título: Petrología de la unidad ecológica del complejo de Cabo Ortegá (NW de España).

Director: Jose Ignacio Gil Ibarra, Universidad del País Vasco

Doctores Componentes del Tribunal

Presidente: Guillermo Corretge, Catedrático, Universidad de Oviedo

Vocales: Ricardo Arenas, P. Titular Universidad Complutense de Madrid. Aphrodite Indares, Professor, Memorial University of Newfoundland, Canada. María Teresa Gomez-Pugnaire, P. Titular, Universidad de Granada

Secretario: Benito Abalos, P. Titular, Universidad del País Vasco

Defensa de la tesis: 20 de diciembre de 1996

Calificación: Apto Cum laude por unanimidad

RESUMEN

La unidad eclogítica estudiada pertenece al dominio estructural más alto del Complejo de Cabo Ortegal (Unidad Catazonal Superior). En esta memoria se presentan los resultados obtenidos a partir del estudio petrológico detallado de las eclogitas que componen esta unidad estableciéndose un modelo para la evolución metamórfica de la misma.

Se ha realizado una cartografía detallada de la unidad, a una escala general 1:25.000 y, localmente, a una escala incluso mayor (1:10.000). Se reconocen tres tipos principales de eclogitas y se establecen las características de afloramiento y estructurales de los mismos. Así mismo, se estudian con detalle las relaciones de estas rocas con los encajantes. Como resultado, se constata la presencia de contactos mecánicos con las rocas adyacentes, así como entre las distintas láminas de eclogitas que componen el afloramiento de la banda de escala kilométrica. Se aborda también el estudio petrográfico de los tres tipos litológicos reconocidos en las eclogitas, así como de otras rocas asociadas a éstas en menor proporción. Con el estudio geoquímico de unas muestras seleccionadas se ha considerado el problema del ambiente geotectónico de formación de los protolitos de las eclogitas y algunas rocas relacionadas, tratando de determinar la causa de las diferencias composicionales existentes entre los tres tipos de eclogitas reconocidos y averiguar la existencia o no de una relación genética entre los mismos.

El estudio mineralógico detallado en cada tipo litológico reconocido ha servido de base para los cálculos termobarométricos junto con los estudios petrográficos y estructurales previos. Para ello se han utilizado varios tipos de algoritmos experimentales y termodinámicos. Se han calculado las condiciones P-T para los distintos estadios reconocidos de la evolución que se relacionan a su vez con las distintas fases de deformación establecidas. Combinando estos datos con los datos geocronológicos disponibles ha sido posible reconstruir parte de la trayectoria P-T-t-d para la unidad eclogítica en Cabo Ortegal.

Las principales conclusiones del presente estudio se pueden resumir como sigue:

(i) La unidad eclogítica está compuesta por tres tipos de eclogitas: las más abundantes o 'comunes' de composición MORB, eclogitas con distena, probablemente de origen acumulativo (troctolítico) y, en menor cantidad, eclogitas ferrotitaníferas, las cuales corresponderían a términos más diferenciados de una serie toleítica. (ii) Las eclogitas comunes de composición MORB constituyen tres láminas tectónicas de potencia variable (100-350 m) y longitud kilométrica limitadas por zonas de cizalla. Estas zonas de cizalla se desarrollan principalmente a lo largo de los afloramientos de eclogitas con distena. Las eclogitas ferrotitaníferas se sitúan en ambos tipos de afloramiento.

(iii) La evolución metamórfica determinada en las eclogitas ofrece resultados de 780 - 800 °C y ca. 22 kbar para el máximo metamórfico asociado a la primera fase de deformación reconocida, D1, y relacionada con un proceso de subducción. Posteriormente se produjo una segunda fase de deformación en condiciones todavía eclogíticas, de 660 °C y 19 kbar, relacionado con el apilamiento de las unidades y probablemente con el comienzo de la exhumación tectónica de estas rocas.

(iv) La evolución retrógrada se caracteriza por un primer estadio de descompresión casi isotérmica con un posterior descenso continuo de P y T. Durante este periodo tienen lugar las fases de deformación D3 y D4 en condiciones extensionales que se relacionan con el emplazamiento del complejo. El ascenso de estas rocas fue fundamentalmente tectónico ya que permitió una preservación considerable de asociaciones de alto grado y el desarrollo local pero intenso de posteriores eventos retrógrados de bajo grado.

(v) La evolución tectonotérmica de la unidad eclogítica de Cabo Ortegal constituye un ejemplo de un fragmento de una corteza oceánica subducida hasta profundidades > 70 km y formación de una cuña orogénica en relación a los materiales tectónicamente superpuestos. Este proceso se considera que marcó el comienzo de la Orogénesis Hercínica hace ca. 395 Ma.

ABSTRACT

The eclogitic unit studied belongs to the uppermost structural domain of the Cabo Ortegal Complex ('upper catazonal unit'). In this memoir we present the results of a detailed petrological study of the eclogites and discuss a model for the metamorphic evolution of the whole unit.

The eclogitic unit has been mapped on a whole at 1:25.000 and, locally, at even greater scale (1:10.000). Three main eclogite types have been recognized and the main occurrence and structural features have been established. The relationships of eclogites to adjacent rocks have been studied in detail. As a result, we have defined a number of shear contacts between eclogites and adjacent rocks and also among different slices of eclogites, forming a kilometer scale eclogite band outcrop. A detailed petrographic study of the three main types of eclogite, as well as of other minor related rocks outcropping within the eclogite band was carried out. A geochemical study of selected samples was performed in the aim to establish the geotectonic environment of the protoliths of eclogites and related rocks. Compositional differences and genetic relationships are discussed.

The detailed mineralogical study of most litho-types recognized, together with the information gathered from the petrographical and structural research, allowed for the thermobarometric calculations performed using various types of experimental and thermodynamically derived algorithms. The P-T conditions were calculated for the different petrological/structural stages recognized in the evolution of the eclogites and related rocks. By combining these results with available geochronological data, it has been possible to reconstruct part of the P-T-t-d path for the eclogitic unit at Cabo Ortegal.

The main conclusions of the present study may be summarized as follows:

(i) The eclogitic unit is composed of three types of eclogite: the most abundant or 'common eclogites' with MORB composition, the kyanite-rich eclogites, likely derived of cumulate (troctolitic) protoliths, and, minor amounts of ferrotitaniferous eclogite, which should correspond to differentiated terms from a tholeiitic series. (ii) Common eclogites with MORB composition constitute three tectonic slices of variable thickness (100-350 m) and kilometer length limited by shear zones. The latter zones are mostly developed along kyanite-rich eclogite occurrences.

(iii) The metamorphic climax occurred at ca. 780-800 °C and 22 kbar, this was associated to the first recognized deformation phase, D1, which is attributed to a subduction process. A second deformation episode, still under eclogitic conditions, occurred at ca. 660 °C and 19 kbar, this was related to the stacking of eclogite slices and probably to the beginning of tectonic exhumation of these rocks. (iv) Retrograde evolution after the high-pressure episodes was characterized by a first stage of decompression under nearly isothermal conditions and subsequent continuous P-T decrease. D3 and D4 deformation phases related to the retrogression suggest an extensional regime in relation with the final emplacement of the complex. A mainly tectonic uplift of the eclogites should account for the preservation of high-grade assemblages and the local but intense subsequent low-grade retrogressive events.

(v) The tectonothermal evolution of the eclogitic unit at Cabo Ortegal reflects subduction to depths > 70 km of an oceanic crust fragment, followed by development of an orogenic wedge in relation to tectonic overthrust of subducted materials. It is considered that this process marked the beginning of the Hercynian Orogenesis ca. 395 Ma ago.

LABURPENA

Ikertutako unitate eklogitikoak Cabo Ortegal Komplexuko egitura-eremu goikoenean dago (Goi-Katazonal Unitatea). Lan honetan, unitate hau osatzen duten eklogitetan buruturiko azterketa petrologiko zehatzaren emaitzak azaltzen dira eta unitate osoaren eboluzio metamorfikorako eredu bat finkatu da.

Unitatearen kartografia zehatza egin da, orokorrean 1:25.000 eskalara eta, lokalki, oraindik eskala handiagora (1:10.000). Unitatea eratzen duten hiru eklogita-mota nagusi ezagutu dira eta hauen azaleramendu-ezaugarriak eta egituraren ezaugarriak aztertu dira. Halaber, arroka hauen eta ostalarien arteko erlazioak xehetasunez aztertu dira, honako emaitzak lortu direlarik: eklogiten eta ondoko arroken arteko kontaktuak mekanikoak dira eta modu berean, eklogiten banda osatzen duten eklogita-laminen artean topatu diren kontaktuak ere mekanikoak direla ikusi da. Bereiztutako hiru eklogita-moten eta hauekin kantitate txikiagoan azaltzen diren beste arroken azterketa petrografikoa egin da. Ondoren, arroka hautatu batzuen azterketa geokimikoaz baliatuz, eklogiten protolitoen ingurune geotektonikoaren arazoa landu dugu. Ezagututako hiru eklogiten konposizio-desberdintasunen arrazoa eta elkarren arteko erlazio genetiko posiblea zehazten ere ahalegindu gara. Halaber, kantitate txikiagoan agertzen diren beste arrokek eklogitekin duten erlazioa finkatzen saiatu gara.

Litologia-mota bakoitzean egin den azterketa mineralogiko zehatza kalkulu termobarometrikoen oinarria izan da, aurretik burututako azterketa petrografiko eta estrukturalarekin batera. Horretarako, mota desberdinetako algoritmoak, experimentalak zein termodinamikoak erabili dira. Arroka hauek jasan duten eboluzioan etapa desberdinetarako P-T baldintzak kalkulatu dira, aldi berean ezarritako deformazio-fase desberdinekin erlazionatuz. Datu hauekin eta erabilgarri diren datu geokronologikoekin batera, Cabo Ortegaleko unitate eklogitikorako P-T-t-d eboluzioaren zati bat berreraikitzea posible izan da.

Ikerketa honen emaitza nagusiak hauek izan dira:

(i) Unitate eklogitikoan hiru eklogita-motak ezagutu dira: ugariena edo eklogita 'arruntak', MORB konposizioa dutenak; eklogita distenadunak, zihurrenik jatorri akumulatiboa dutenak (troktoolitikoa); eta, kantitate urriagoan, eklogita ferrotitaniferoak, segida toleitiko baten termino desberdinduenak. (ii) MORB konposizioeko eklogita arruntak, potentzia aldakorreko (100-350 m) eta kilometroko luzera duten hiru lamina eratzen azaltzen dira. Lamina hauek zizaila-zonaz mugatuak daude eta zona hauek eklogita distenadunak azaleratzen diren lekuetan garatzen dira batik bat. Eklogita ferrotitaniferoak azaleramendu-mota bietan agertzen dira.

(iii) Eklogitetan aztertutako eboluzio metamorfikoak honako emaitzak eman ditu: ezagutzen den lehenengo deformazio-fasearekin (D1) lotzen den maximo metamorfikorako, 780 - 800 °C eta 22 kbar. Fase hau subdukzio prozesu batekin erlazionatzen da. Ondoren eta oraindik baldintza eklogitotan, 660 °C eta 19 kbar, bigarren deformazio-fasea gertatzen da. Fase hau, unitateen pilaketa-ekin eta, zihurrenik, arroka hauen exhumazio tektonikoarekin ere erlazionatzen da. (iv) Eboluzio erretrogradoa baldintza ia isoterminoan ematen den hasierako deskonpresioagatik bereizten da, ondo-

ren P eta T-ren jaitsiera jarraia gertatzen delarik. Denboraldi honetan, baldintza extentsioaletan gertatutako D3 eta D4 deformazio-faseek hartzen dute parte eta hauek Konplexuaren lekutzearekin erlazionatuta daude. Arroka hauen igoera batetik bat tektonikoa da gradu altuko paragenesien babesagatik eta gradu baxuagoko gertaera erretrogradoen garapen lokala baina intentsitate handikoagatik ondoriozta daitekeenez.

(v) Unitate eklogitikoaren eboluzioa sakonera handitara, >70 km, subduzituriko lurrazal ozeaniko baten zatiaren eta tektonikoki gainjarritako materialen falka orogeniko baten eraketaren adibidea da. Prozesu hau Orogenesi Hertziniarraren hasieratzat hartzen da, orain dela 395 Ma.

**PETROLOGÍA DE LA UNIDAD ECLOGÍTICA
DEL COMPLEJO DE CABO ORTEGAL
(NW DE ESPAÑA)**

ÍNDICE

Página

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

I.1. INTRODUCCIÓN	29
I.1.1. Presentación y objetivos	29
I.1.2. Métodos	31
I.2. SITUACIÓN GEOGRÁFICA	33
I.3. SITUACIÓN GEOLÓGICA	35
I.4. LA GEOLOGÍA DEL COMPLEJO DE CABO ORTEGAL: EVOLUCIÓN Y ESTADO ACTUAL DE LOS CONOCIMIENTOS	41
Propuesta de un esquema de trabajo simplificador	52
I.5. ECLOGITAS: REVISIÓN DEL PROBLEMA DE LA NOMENCLATURA	54
Terminología utilizada	57

CAPÍTULO II. CARACTERÍSTICAS LITOLÓGICAS DE LAS ECLOGITAS DE CABO ORTEGAL Y ROCAS ASOCIADAS

II.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS AFLORAMIENTOS	61
II.1.1. Tipos de eclogitas	63
El afloramiento de los "doubtful paragneisses" (Vogel, 1967a)	65
II.2. DESCRIPCIÓN DE LAS ECLOGITAS	66
II.2.1. Eclogitas comunes o de composición N-MORB	66
II.2.1.1. Descripción macroscópica.	66
II.2.1.2. Descripción microscópica	67
a) Eclogitas frescas	67
b) Eclogitas comunes retrogradadas	70

II.2.2. Ecogitas con distena o ricas en Al-Mg	74
II.2.2.1. Descripción macroscópica	74
a) Ecogitas masivas frescas	74
b) Ecogitas deformadas retrogradadas	75
c) Rocas ultrabásicas con distena y estauroлита	76
II.2.2.2. Descripción microscópica	76
a) Ecogitas masivas frescas	76
b) Ecogitas retrogradadas	80
Ecogitas poco deformadas	80
Ecogitas muy deformadas	81
c) Rocas ultrabásicas con distena y estauroлита	82
II.2.3. Ecogitas ricas en Fe y Ti o ferrotitaníferas	83
II.2.3.1. Descripción macroscópica	83
II.2.3.2. Descripción microscópica	83
a) Ecogitas de grano medio-grueso (Tipo I)	83
b) Ecogitas de grano medio a fino (Tipo II)	86
II.2.4. Ecogitas de la terminación Sur de la banda	88
II.2.4.1. Modo de afloramiento	88
II.2.4.2. Descripción macroscópica	89
II.2.4.3. Descripción microscópica	89
II.2.4.4. Conclusiones a las ecogitas de la zona Sur de la banda	90
II.3. OTRAS ROCAS DE LA BANDA ECLOGÍTICA	90
II.3.1. Venas pegmatoides	90
II.3.1.1. Descripción macroscópica	90
II.3.1.2. Descripción microscópica	91
II.3.1.3. Significado de las inyecciones trondhjémíticas	92
II.3.2. Granulitas	93
II.3.2.1. Modo de afloramiento	93
II.3.2.2. Descripción macroscópica	94
II.3.2.3. Descripción microscópica	94
Evolución retrógrada	95
Criterios de distinción entre granulitas y ecogitas retrogradadas	95
II.3.3. Gneises	96
II.3.3.1. Modo de afloramiento	96
II.3.3.2. Descripción macroscópica	97
II.3.3.3. Descripción microscópica	97
II.3.4. Rocas con onfacita-granate-plagioclasa	99
II.3.4.1. Modo de afloramiento	99
II.3.4.2. Descripción macroscópica	99
II.3.4.3. Descripción microscópica	100
II.3.4.4. Significado de las rocas con onfacita-granate-plagioclasa	100
II.3.5. Gneises anfibólicos o anfibólico-piroxénicos	101
II.3.5.1. Modo de afloramiento	101
II.3.5.2. Descripción macroscópica	102
II.3.5.3. Descripción microscópica	102
II.3.5.4. Significado de los gneises anfibólicos	103
II.3.6. Rocas ultramáficas	103
II.3.6.1. Modo de afloramiento	104
II.3.6.2. Descripción macroscópica	104
II.3.6.3. Descripción microscópica	104
II.3.6.4. Significado de las rocas ultramáficas	104

**CAPÍTULO III.
ESTRUCTURA DE LAS ECLOGITAS**

III.1. INTRODUCCIÓN	107
III.2. RELACIONES ENTRE LOS DISTINTOS TIPOS DE ECLOGITAS: DISPOSICIÓN DE LOS AFLORAMIENTOS Y CONTACTOS INTERNOS DE LA BANDA	107
III.3. RELACIONES DE LA BANDA DE ECLOGITAS CON LAS ROCAS ADYACENTES	111
III.3.1. El contacto entre la banda de eclogitas y la unidad granulítica de La Capelada.	112
III.3.2. El contacto entre la banda de eclogitas y los gneises bandeados	114
III.4. ESTRUCTURA INTERNA DE LA BANDA DE ECLOGITAS	115
III.5. FASES DE DEFORMACIÓN	116
III.5.1. Fases de deformación según estudios anteriores	116
III.5.2. Fases de deformación reconocidas en el presente estudio	117
Fase D1	118
Fase D2	118
Fases D3, D4 y estructuras tardías	119
III.6. SIGNIFICADO DE LAS ESTRUCTURAS OBSERVADAS	120
Pliegues cartográficos	120
Zonas de cizalla	122
III.7. CRITERIOS CINEMÁTICOS	122
III.8. CONCLUSIONES AL ESTUDIO ESTRUCTURAL	123

**CAPÍTULO IV.
GEOQUÍMICA DE ROCA TOTAL**

IV.1. INTRODUCCIÓN	129
IV.2. GRUPOS LITOLÓGICOS Y MUESTRAS ESTUDIADAS	129
IV.3. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	131
IV.3.1. Diagramas de variación	135
IV.3.1.a. Elementos mayores	135
IV.3.1.b. Elementos traza	136
IV.3.2. Conclusiones derivadas de los diagramas de variación.	139
IV.3.3. Diagramas multielementales normalizados	139
IV.3.3.a. Diagramas según Thompson et al. (1984)	139
IV.3.3.b. Diagramas de tierras raras	141
IV.3.4. Conclusiones a los diagramas multielementales normalizados	143
IV.4. DIAGRAMAS DE DISCRIMINACIÓN TECTONOMAGMÁTICA	145
Elementos mayores	145
Elementos Traza	149
IV.5. CONCLUSIONES	149

CAPÍTULO V. MINERALOGÍA

V.1. INTRODUCCIÓN	153
V.2. GRANATE	153
V.2.1. Composición de los granates de las eclogitas	153
V.2.2. La zonación de los granates en las eclogitas	158
V.2.2.1. Introducción	158
V.2.2.2. Zonación de los granates de las eclogitas comunes	161
a) Eclogitas poco o nada retrogradadas	161
b) Zonación de granates en retroeclogitas comunes deformadas	166
V.2.2.3. Zonación de los granates de las eclogitas con distena	169
a) Eclogitas poco o nada retrogradadas	169
b) Eclogitas deformadas que conservan la paragénesis eclogítica	171
c) Eclogitas retrogradadas y deformadas	174
d) Roca ultrabásica con distena y estaurolita	174
V.2.2.4. Granates de las eclogitas ferro-titaníferas	176
V.2.2.5. Granates de las eclogitas de la terminación Sur de la banda	176
V.2.2.6. Conclusiones sobre el zonado de los granates en las eclogitas	176
V.2.3. Granates de rocas con onfacita-granate-plagioclasa y gneises anfibólico-piroxénicos	180
V.3. CLINOPIROXENO	180
V.3.1. Composición de los clinopiroxenos de las eclogitas	180
V.3.1.1. Eclogitas comunes	182
a) Eclogitas frescas	182
b) Retroeclogitas comunes y gneises anfibólicos	185
V.3.1.2. Eclogitas con distena	185
a) Eclogitas frescas	185
b) Eclogitas deformadas que conservan la paragénesis eclogítica	187
c) Eclogitas con distena retrogradadas y deformadas	187
V.3.1.3. Eclogitas ferrotitaníferas	188
V.3.1.4. Composición de los clinopiroxenos de las eclogitas de la terminación Sur de la banda ..	190
V.3.2. Composición de los piroxenos de gneises anfibólico-piroxénicos y onfacíticos	190
V.3.3. Interpretación	190
Proceso de simplectitización de la onfacita	191
V.4. ANFÍBOL	192
V.4.1. Composición de los anfíboles de las eclogitas	194
V.4.1.1. Eclogitas comunes	194
V.4.1.2. Eclogitas con distena	196
Rocas ultrabásicas con distena y estaurolita	198
V.4.1.3. Eclogitas ferrotitaníferas	198
V.4.1.4. Eclogitas de la terminación Sur de la banda	200
V.4.2. Anfíboles de gneises anfibólico-piroxénicos y anfíbolitas	202
V.4.3. Sustituciones	202
Aproximación cualitativa a las condiciones de formación de los anfíboles de las eclogitas ..	206
V.5. GRUPO DE LA EPIDOTA: ZOISITA, CLINOZOISITA, EPIDOTA Y ALLANITA	207
V.5.1. Composición de las zoisitas de eclogitas	208
V.5.1.1. Eclogitas comunes	208
V.5.1.2. Eclogitas con distena	209

V.5.1.3. Eclogitas ferrotitaníferas	211
V.5.1.4. Composición de las zoisitas en eclogitas de la terminación Sur de la banda	211
V.5.2. Composición de zoisitas en gneises anfibólico-piroxénicos y rocas con onfacita-granate-plagioclasa	211
V.5.3. Conclusiones sobre la composición de las zoisitas	212
V.6. DISTENA	212
V.6.1. Composición de las distenas de eclogitas	213
V.6.2. Composición de las distenas de la roca ultrabásica con distena y estaurolita	216
V.6.3. Aproximación a las condiciones de formación de las distenas cromíferas en eclogitas y en rocas ultrabásicas con Ky - St	216
V.7. MICAS	217
V.7.1. Fengita	217
V.7.1.1. Composición de la mica fengítica	218
Eclogitas comunes	218
Eclogitas con distena	218
V.7.1.2. Sustituciones	219
V.7.2. Paragonita	224
V.7.2.1. Sustituciones	225
V.7.3. Margarita	225
V.7.4. Biotita	225
V.8. ESTAUROLITA	227
V.8.1. Composición de la estaurolita de las eclogitas	227
V.8.2. Composición de la estaurolita de las rocas ultrabásicas con distena y estaurolita	228
V.8.3. Sustituciones para todas las estaurolitas	230
V.9. CUARZO	232
V.10. FELDESPATO	232
V.11. RUTILO	234
V.12. MINERALES DEL GRUPO DE LA ESPINELA	234
V.13. APATITO	234
V.14. CARBONATOS	235
V.15. CORINDÓN	235
V.16. CLORITA	235

CAPÍTULO VI. TERMOBAROMETRÍA

VI.1. INTRODUCCIÓN	239
VI.2. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN: GEOTERMÓMETROS Y GEOBARÓMETROS UTILIZADOS	239
VI.2.1. Consideraciones generales	239
VI.2.2. Métodos convencionales de estimación de las condiciones del máximo metamórfico eclogítico	241
VI.2.2.1. Geotermometría del par granate-clinopiroxeno	241

Formulación de Ellis y Green (1979)	242
Formulación de Powell (1985)	242
Formulación de Krogh (1988)	242
Formulación de Yang Ai (1994)	243
Formulación de Berman et al. (1995)	243
Formulación de Ganguly (1979)	243
VI.2.2.2. Geotermometría del par granate-hornblenda	244
Formulación de Graham y Powell (1984)	244
Formulación de Perchuk (1991)	244
VI.2.2.3. Geotermometría del par granate-fengita	245
Formulación de Green y Hellman (1982)	245
VI.2.2.4. Geotermometría del par granate-biotita	245
Formulación de Lavrent'eva y Perchuk (1981)	246
Formulación de Perchuk y Lavrent'eva (1983)	246
Formulación de Patiño Douce et al. (1993)	246
Formulación de Aranovich et al. (1988)	247
VI.2.2.5. Geotermometría del par granate-clinozoisita	247
Termómetro de Perchuk (1991)	247
VI.2.2.6. Geobarometría de la asociación eclogítica primaria	247
Barómetro de Holland (1980, 1990)	248
Barómetro de Perchuk (1992)	248
VI.2.2.7. Geobarometría de rocas con mica fengítica	248
Barómetro de Massonne y Schreyer (1987)	248
VI.2.3. Métodos de consistencia interna de datos termobarométricos o método del multiequilibrio ..	248
Otros métodos de estimación de las condiciones PT	251
Desestabilización de la paragonita	251
Desestabilización de la zoisita	251
VI.2.4. Métodos de estimación de las condiciones pre- y post-máximo metamórfico eclogítico ..	252
VI.2.4.1. Geotermometría de asociaciones con plagioclasa	252
Termómetro de Blundy y Holland (1990)	252
Termómetro de Holland y Blundy (1994)	253
VI.2.4.2. Geobarometría de asociaciones con plagioclasa	253
VI.2.4.2.a. Asociación granate - clinopiroxeno - plagioclasa - cuarzo	253
Barómetro de Eckert et al. (1991)	253
VI.2.4.2.b. Asociación granate - anfíbol - plagioclasa - cuarzo	254
Barómetro de Kohn y Spear (1990)	254
VI.2.4.2.c. Barometría de la asociación granate - biotita - plagioclasa	254
Barómetro de Hoisch (1990)	254
VI.2.5. Otros métodos de estimación	255
VI.3. RESULTADOS P-T	255
VI.3.1. Condiciones del metamorfismo progrado	258
VI.3.1.1. Eclogitas comunes	258
VI.3.1.2. Eclogitas con distena	259
VI.3.1.3. Eclogitas ferrotitaníferas	261
VI.3.1.4. Discusión de los resultados	262
VI.3.2. Condiciones del máximo eclogítico	263
VI.3.2.1. Eclogitas comunes	264
VI.3.2.1.a. Granates con zonación prograda	264
VI.3.2.1.b. Granates homogeneizados	265
Eclogitas del extremo Sur de la banda	265
VI.3.2.1.c. Discusión	267

VI.3.2.2. Eclogitas con distena	267
VI.3.2.2.a. Granates con zonación progradada	267
Eclogitas con textura granoblástica orientada original preservada (D1)	267
Eclogitas deformadas y recrystalizadas (D2)	268
Observaciones	270
VI.3.2.2.b. Granates homogeneizados	271
Eclogitas con textura granoblástica original preservada (D1)	271
Eclogitas deformadas y recrystalizadas (D2)	273
Observaciones	274
VI.3.2.2.c. Granates con perfiles complejos	274
VI.3.2.2.d. Discusión	274
VI.3.2.3. Eclogitas ferrotitaníferas	275
VI.3.2.3.a. Granates con zonación progradada	276
VI.3.2.3.b. Granates homogéneos	276
VI.3.2.3.c. Observaciones	277
VI.3.2.4. Condiciones P-T máximas: Discusión	277
VI.3.3. Condiciones de la evolución post-máximo metamórfico eclogítico	280
VI.3.3.1. Eclogitas comunes	280
VI.3.3.1.a. Retrogradación de eclogitas no deformadas	280
VI.3.3.1.b. Retrogradación de eclogitas comunes deformadas (D3)	282
VI.3.3.2. Eclogitas con distena	282
VI.3.3.1.a. Retrogradación de eclogitas poco o nada afectadas por D3	282
VI.3.3.1.b. Retrogradación de eclogitas milonitizadas (D3)	284
VI.3.3.3. Eclogitas ferrotitaníferas	284
VI.3.3.4. Resumen de los resultados sobre la evolución post-máximo metamórfico eclogítico ...	288

**CAPÍTULO VII.
TRAYECTORIAS P-T-t-d Y EVOLUCIÓN GEODINÁMICA**

VII.1. INTRODUCCIÓN	291
VII.2. CARACTERÍSTICAS DE LA TRAYECTORIA P-T-d	291
VII.2.1. Evolución en condiciones eclogíticas	291
VII.2.2. Evolución post-máximo eclogítico	296
VII.3. EVOLUCIÓN GEODINÁMICA	297

**CAPÍTULO VIII.
CONCLUSIONES GENERALES**

VIII. CONCLUSIONES GENERALES	303
------------------------------------	-----

**CAPÍTULO IX
BIBLIOGRAFÍA**

BIBLIOGRAFÍA	313
--------------------	-----

APÉNDICES

A.I. MÉTODOS	341
A.I.1. Cálculo de las fórmulas estructurales, estimación de Fe ² /Fe ³ y componentes de las soluciones sólidas	341
Granate	341
Clinopiroxeno	341
Anfibol	343
Minerales del grupo de la epidota: zoisita, clinozoisita, epidota y allanita	344
Distena	344
Grupo de las micas: moscovita, paragonita y biotita	344
Estauroлита	345
Feldespatos - Plagioclasa	346
Carbonatos	347
Opacos: rutilo, espinela	347
Corindón	347
A.I.2. Métodos de estimación de la moda	347
A.II. ANÁLISIS DE ROCA TOTAL	349
A.III. ANÁLISIS DE MINERALES	353
Lista de Tablas	355
Tablas V.1, V.2, V.3 y V.4: análisis de granates	356
Tablas V.5, V.6, V.7, V.8 y V.9 : análisis de piroxenos	375
Tablas V.10, V.11, V.12 y V.13: análisis de anfíboles	392
Tablas V.14, V.15, V.16 y V.17: análisis de los minerales del grupo de la epidota	400
Tablas V.18 y V.19: análisis de distena	405
Tablas V.20, V.21, V.22, V.23, V.24, V.25 y V.26: análisis de micas	408
Tablas V.26 y V.27: análisis de estauroлита	415
Tablas V.29, V.30 y V.31: análisis de feldespatos	418
Tabla V.32: análisis de rutilo	421
Tabla V.33: análisis de espinela	421
Tablas V.34: análisis de carbonato	423
Tablas V.35: análisis de corindón	423
LÁMINAS DE FOTOS	425