



**MÁSTER EN RECURSOS GEOLÓGICOS E
INGENIERÍA GEOLÓGICA**



Trabajo Fin de Máster

**CATACLASIS RELICTA EN MÁRMOLES
DE ALTA P Y BAJA T**

Autora: Indira Rodríguez Álvarez

Junio 2014

Dña. Indira Rodríguez Álvarez, autora del Trabajo Fin de Máster titulado “*Cataclasis relictas en mármoles de alta P y baja T*”, confirma que es un trabajo original y solicita su presentación en el Máster Universitario Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 6 de Junio de 2014

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized capital 'A' followed by a horizontal line and a small flourish.

Fdo. Indira Rodríguez Álvarez

El Dr. Francisco José Fernández Rodríguez, Profesor Titular del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo, confirma que ha tutelado el trabajo “*Cataclasis relictas en mármoles de alta P y baja T*”, realizado por Dña. Indira Rodríguez Álvarez, y autoriza su presentación y defensa como Trabajo Fin de Máster en el Máster Universitario en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 6 de Junio de 2014

A handwritten signature in blue ink, featuring a large, stylized capital 'F' followed by a horizontal line and a small flourish.

Fdo. Francisco José Fernández Rodríguez

AGRADECIMIENTOS

En todos los meses que han transcurrido desde que comencé con este proyecto hay una serie de personas que han estado ahí de manera continua o de manera puntual. Por encima de todos ellos quiero agradecer a Francisco José Fernández todo lo que he aprendido y el ejemplo que me ha dado para no perder la pasión y continuar en busca de nuevos proyectos. Sin duda una mención muy especial se la merece Javier

Escuder-Virquete, que en todo momento me ha ofrecido su ayuda y su tiempo. Quiero agradecer a Idoia Rosales su trato y el tiempo empleado para enseñarme el manejo del equipo de catodoluminiscencia en Tres Cantos. También a estado ahí Mercedes Fuentes Fuente, que me orientó en la búsqueda de un “personaje” que se resiste a aparecer en escena. A todos ellos: GRACIAS.

Y como no, agradecer a quienes no sólo han estado sino que me han aguantado tanto en Oviedo como en León. Mis compañeros de cafés, dudas, dichas, desdichas, ... que me han regalado su tiempo, en especial Miguel Alonso, con quien aprendí a darle una nueva dimensión a papel. Gracias a vosotros siempre recordaré Oviedo con una sonrisa.

INDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	5
1.1 La geología del Complejo de Samaná: antecedentes	13
1.1.1 Unidades litoestratigráficas y sus condiciones metamórficas.....	14
1.1.2 La estructura y su relación con el metamorfismo	16
METODOLOGÍA y RACIONALIDAD DEL MUESTREO	20
2.1 Cribado del muestreo	21
2.2. Métodos analíticos	22
RESULTADOS.....	25
3.1 Descripción petrográfica de las imágenes OM	25
3.1.1 Esquistos de Santa Bárbara	25
3.1.2 Punta Balandra	30
3.2 Análisis de distribución de tamaños de grano (GSD) de las imágenes OM	34
3.2.1 Diagramas GSD-OM	34
3.2.2 Diagramas de Orientación-OM	36
3.2.3 Diagramas de Forma-OM	37
3.2.4 Diagramas $\log(\text{frecuencia})/\log(r_i)$ -OM.....	39
3.3 Descripción petrográfica de las imágenes de Optical-CL.....	40
3.3.1 Esquistos de Santa Bárbara	40

3.3.2 Punta Balandra	43
3.4 Análisis de GSD de las imágenes de Optical-CL	47
3.4.1 Diagramas GSD-CL	47
3.4.2 Diagramas de Orientación-CL	49
3.4.3 Diagramas de Forma-CL	49
3.4.4 Diagramas $\log(\text{frecuencia})/\log(r_i)$ -CL	51
DISCUSIÓN	52
CONCLUSIONES	56
BIBLIOGRAFÍA	57

RESUMEN

El Complejo de Samaná consiste en una porción cortical exhumada de la plataforma carbonatada de las Bahamas, compuesta básicamente de mármoles y calcoesquistos. Está situado en el borde convergente noreste de la Isla Española. El estudio microtectónico de los mármoles y calcoesquistos muestra una secuencia inversa de los mecanismos de deformación dominantes durante el proceso de exhumación. La deformación comenzó con cataclasis en condiciones de alta presión ($1,6 < P < 2$ GPa) y baja temperatura ($400 < T < 480^\circ\text{C}$). La alta presión de fluidos pudo disminuir la resistencia mecánica de los mármoles y consecuentemente desencadenar el proceso de exhumación. Después del proceso cataclástico, el *creep* de disolución fue favorecido por la reducción del tamaño de grano de la calcita y la disminución de la presión efectiva. Progresivamente la presión de fluidos fue disminuyendo durante la exhumación, lo que produjo un aumento del esfuerzo efectivo hasta que la deformación plástica llegó a ser el mecanismo dominante en un rango de $300 < T < 500^\circ\text{C}$. Así, la recristalización dinámica se produjo principalmente por migración de bordes de grano con paleoesfuerzos próximos a los 150 MPa, aunque la incidencia de maclado indica que en la lámina exhumada desde mayor profundidad se llegaron a alcanzar paleoesfuerzos superiores a los 300 MPa. A pesar de los cambios en los mecanismos de deformación dominantes, de las variaciones en la presión efectiva y de que las unidades yuxtapuestas tectónicamente alcanzaron diferentes profundidades máximas, las tres unidades estudiadas se exhumaron a la misma velocidad con un $\Delta P^I = 112,5 \text{ MPa Myr}^{-1}$.

Este estudio se centra en la deformación relictas cataclástica en mármoles y calcoesquistos mediante imágenes de catodoluminiscencia. Las texturas cataclásticas relictas presentan siempre una distribución de tamaños de grano de calcita de tipo potencial. El ajuste para la fracción de mayor tamaño ($1,6 < \log(r_i) < 2,4$) se caracteriza por presentar una dimensión fractal $2,17 < D < 2,97$, la cual es habitual para cataclasis carbonatadas. Sin embargo la fracción de menor tamaño ($0,9 < \log(r_i) < 1,7$) se caracteriza por una $D < 1,1$, por debajo del rango que caracteriza los procesos de fragmentación. La menor pendiente de la línea de ajuste de la fracción de grano fina indica que el mecanismo de deformación dominante fue escalon-dependiente. El desarrollo de microestructuras cataclásticas relictas, en relación con un bandeo composicional donde se concentra el material insoluble, así como la alta presión de fluidos durante todo el proceso de exhumación indican que el mecanismo dominante debió ser el *creep* de disolución-precipitación. Los parámetros de forma S y de elipticidad de la fracción fina son consistentes con esta interpretación. Finalmente, el aumento de los esfuerzos diferenciales durante el proceso de exhumación bloqueó el *creep* de disolución a favor de la deformación plástica intracrystalina.

ABSTRACT

The Samaná Complex consists of exhumed slice of the Bahama carbonate platform, basically composed of marbles and calcschists. It is located on the convergent northeastern Caribbean boundary of the Hispaniola Island. The microtectonic study of marbles and calcschists is showing a reverse sequence of dominant deformation mechanisms. The deformation started by cataclasis at high pressure ($1.6 < P < 2$ GPa) and low temperature ($400 < T < 480^\circ\text{C}$). The high fluid pressure could decrease the carbonated rocks strength and consequently triggered the exhumation process. The dissolution creep was dominant after cataclasis process, since effective stress decreased and the calcite grain size was refined. Progressively fluid pressure decreased during exhumation, then effective stress increased just to intracrystalline plasticity become the dominant mechanism of deformation in a range of $300 < T < 500^\circ\text{C}$. So, dynamic recrystallization mainly occurred by grain boundary migration at paleostress about 150 MPa, although twinning incidence indicates that paleostress about 300 MPa have been reached in the unit exhumed from higher deep. Despite of the changes in the dominant deformation mechanisms, the variation in effective pressure and the different pressure maxima records in the tectonic juxtaposed units, these three studied units have been exhumed at the same exhumation rate $\Delta P^I = 112.5 \text{ MPa Myr}^{-1}$.

This study is focused on the relict cataclasis in marbles and calcschists by the analysis of optical cathodoluminescence images. The relict cataclastic fabrics present calcite grain size distribution of the power-law type. The large size fraction ($1.6 < \log(r_i) < 2.4$) has a fractal dimension $2.17 < D < 2.97$, which is usual in natural carbonate cataclasites. However, finer fraction ($0.9 < \log(r_i) < 1.7$) is characterized by $D < 1.1$, which is lower than any values obtained for fragmentation process. The fine fraction has a lineal fit of lower slope, indicating that the dominant deformation mechanism is scale-dependent. The development of cataclastic microstructures related to compositional foliation defined by concentration of unsolute material, as well as the high fluid pressure operated during exhumation, indicate dissolution creep might be the dominant deformation mechanism. The shape and ellipticity parameters obtained for the finer fractions are consistent with this interpretation. Finally, the increase of paleostress during the exhumation process cut off dissolution-precipitation creep to support intracrystalline plasticity.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La Española es una isla del archipiélago de las Antillas Mayores. Esta isla, desde el punto de vista tectónico, forma parte de una microplaca situada entre dos zonas de subducción activas. La placa Norteamericana converge hacia la fosa de Puerto Rico por el Norte de la Española, mientras que la placa Caribeña converge hacia la fosa de Los Muertos por el Sur (Fig. 1).

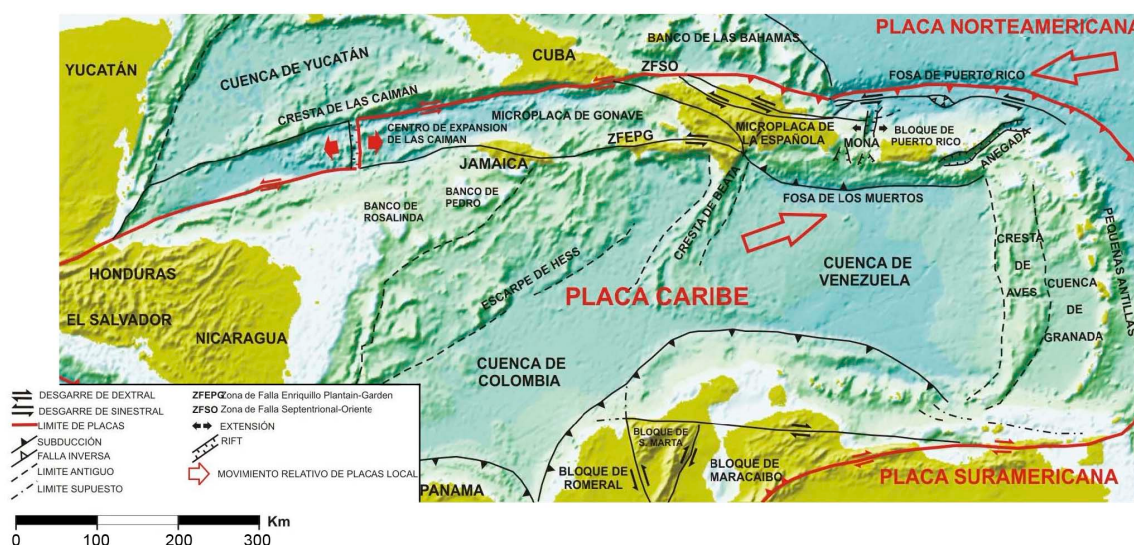


Figura 1: Contexto tectónico de la Isla de la Española en el borde septentrional de la microplaca Caribeña. Tomado de Granja (2005).

El área objeto de estudio se localiza en la península de Samaná, en el extremo NE de la Española, donde aflora un complejo de alta presión (P). El Complejo de Samaná está formado por series de rocas ofiolíticas y melanges carbonatadas imbricadas en unidades superpuestas tectónicamente (Escuder-Virue, 2008a). En el borde E de la península de Samaná, tres unidades tectonometamórficas se superponen dando una secuencia inversa, de manera que la unidad situada más hacia el S, la Unidad Punta Balandra que presenta calcoesquistos con paragénesis minerales que indican condiciones en facies eclogíticas de baja temperatura (T), se superpone tectónicamente sobre los calcoesquistos de Santa Bárbara, que presenta paragénesis de la facies de los esquistos azules con granate, y estos se superponen hacia el N sobre los Mármoles del Rincón, que presenta paragénesis que indican que esta unidad sólo alcanzó la facies de los esquistos azules con epidota (Fig. 2). Las rocas de las tres unidades están fuertemente foliadas. A escala cartográfica se puede reconstruir la estructura de la foliación formando pliegues de amplitud kilométrica, fuertemente apretados, de vergencia

NNE y cortados por cabalgamientos que indican acortamiento en el mismo sentido. La superposición de las unidades cabalgantes produce un apilamiento tectónico de unos 10 km de espesor. En varias campañas de campo previas a este estudio se han realizado varios muestreos de los mármoles y calcoesquistos de las tres unidades, sobre los que se han podido determinar con precisión las trayectorias P - T - t retrógradas de las rocas carbonatadas (Escuder-Viruete y Pérez-Estaún, 2006, Escuder-Viruete et al., 2011a y b).

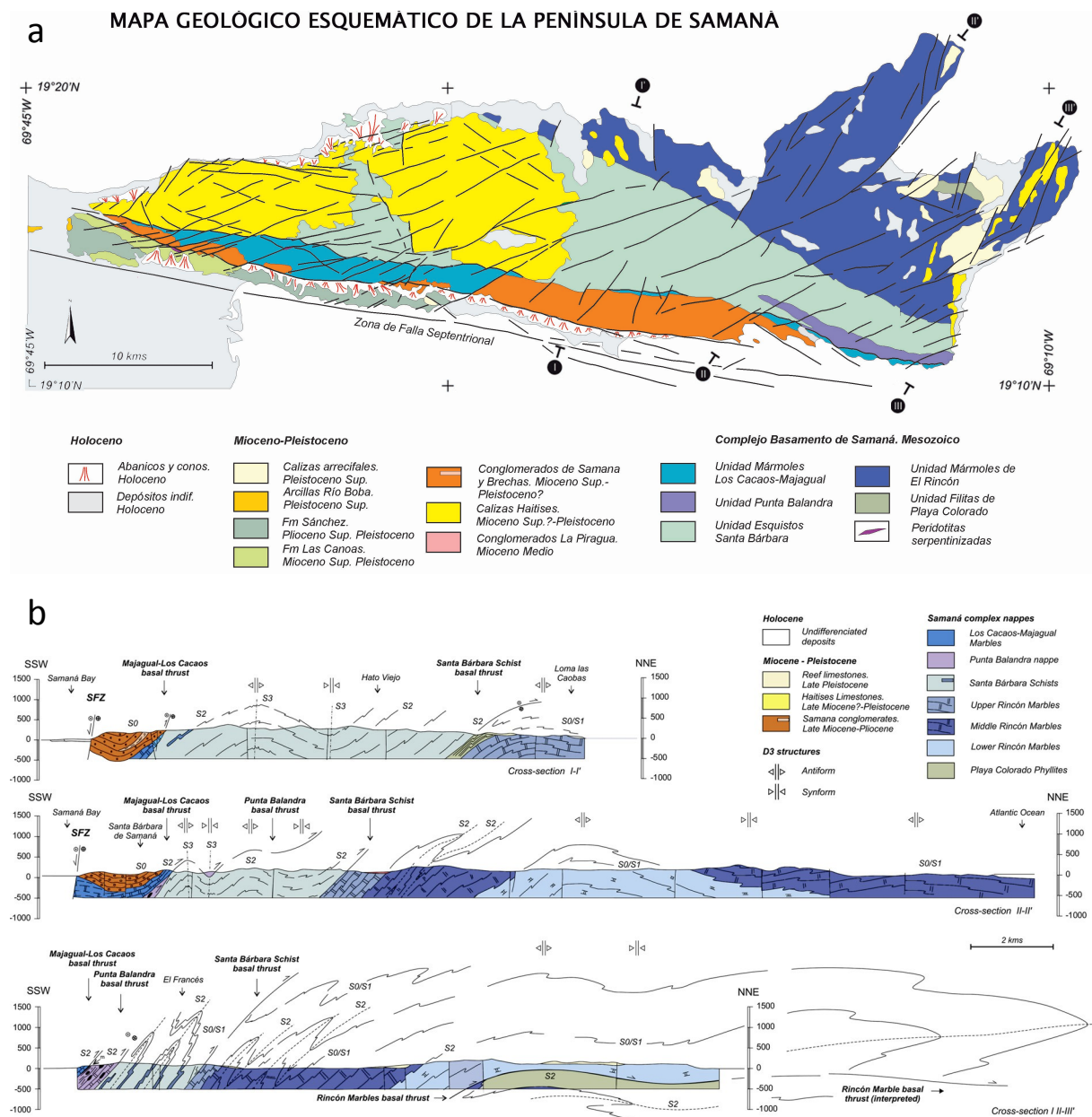


Figura 2: Mapa geológico de la península de Samaná (a) y tres cortes seriados en los que se reconoce la estructura de las principales unidades tectónicas del Complejo de Samaná (b) (Tomado de Escuder-Viruete et al., 2011b).

Sobre la base de estos trabajos, se inició un estudio microtectónico en los mármoles y calcoesquistos de estas tres unidades (Fernández et al., 2012). El principal objetivo era determinar los mecanismos de deformación que actuaron durante el proceso de exhumación en el que se desarrolló la foliación principal. Así, a través de las microestructuras desarrolladas en los mármoles y calcoesquistos, tales como el maclado mecánico y la recristalización dinámica de la calcita, migración de bordes de grano, bordes de disolución, *ribbons*, budines y estructuras en manto complejas, intentar establecer las condiciones ambientales (P , T , esfuerzo efectivo y presión de fluidos) en las que los distintos mecanismos actuaron, cómo se superpusieron y en qué rango de condiciones dominaron unos sobre los otros.

Los resultados preliminares fueron un poco sorprendentes puesto que los mármoles y calcoesquistos presentaban una débil fábrica de orientación cristalográfica preferente (CPO) que es similar en las tres unidades tectonometamórficas, aunque éstas se hubiesen exhumado desde diferentes profundidades máximas y a pesar de que el gradiente de exhumación tectónico fue muy elevado ($>100 \text{ MPaMyr}^{-1}$). Las CPOs de calcita de los mármoles y calcoesquistos muestran una débil orientación preferente de los ejes c $\langle 0001 \rangle$ y de los polos de los planos de macla e $\{-1018\}$ que se orientan paralelos al plano de foliación tectónica y perpendiculares a la lineación mineral o dirección 100 (Fig. 3). La orientación de las maclas respecto a los ejes ópticos permite deducir un régimen de tipo extensional. Ambas orientaciones son coaxiales con respecto a la disposición del plano de foliación. Estas dos características sugieren que durante el desarrollo de la foliación principal dominó el aplastamiento (Fernández et al., 2012). Además las calcitas de los mármoles y calcoesquistos están intensamente macladas. Frecuentemente las calcitas presentan hasta tres familias de maclas en un solo cristal de calcita, en el que se superponen cualquiera de las cuatro tipologías más frecuentes de maclas definidas por Burkhard (1993) (Fig. 4a).

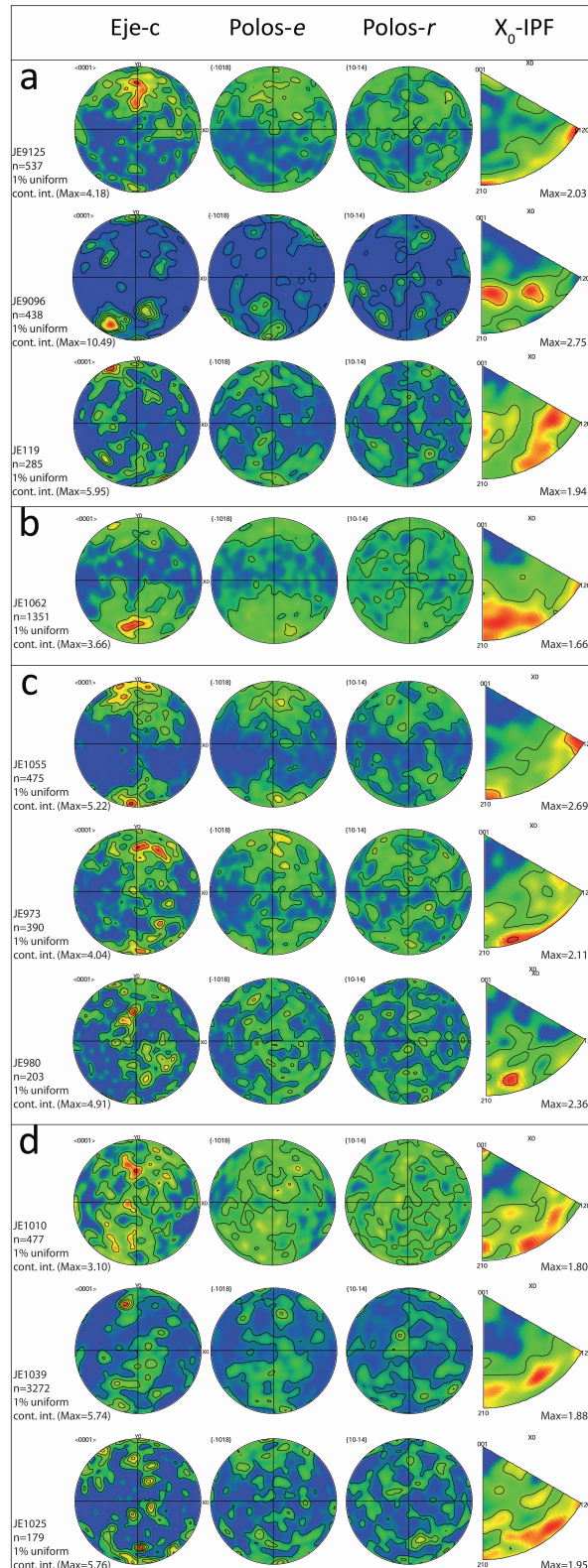


Figura 3: Fábricas de orientación cristalográfica preferente de calcita obtenidas por Fernández et al. (2012), en mármoles y calcoesquistos del Complejo de Samaná mediante un detector de EBSD montado en un SEM del departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Liverpool. Los distintos apartados a, b, c y d corresponden respectivamente a la Unidad Punta Balandra, Esquistos de Santabárbara, Mármoles del Rincón (unidad superior) y Mármoles del Rincón (unidad media). Las muestras sobre las que se realizaron las fábricas se pueden localizar en la Fig. 8a.

Mediante un estudio de incidencia de maclado utilizando la calibración de Rowe y Rutter (1990) se obtuvieron unos máximos de paleoesfuerzos anómalamente altos (>300 MPa) en las muestras de Punta Balandra. Sin embargo, los valores de paleoesfuerzo atribuibles a flujo de estado estable indican un rango de valores más habituales (150 ± 30 MPa) y similares en las tres láminas muestreadas. Estos valores se calcularon con la fracción de grano fino segunda (*ff.2* de la Tabla 1). La *ff.2* se interpretó como la que corresponde al tamaño de granos recrystalizados por migración de borde de grano y el paleopiezómetro utilizado fue el calibrado por Rutter (1995).

Estos resultados preliminares pusieron en evidencia que la deformación plástica que mostraban los mármoles y calco-esquistos de forma generalizada tan sólo era una parte del proceso de exhumación, en el que los esfuerzos diferenciales alcanzaban valores anómalamente altos conforme la roca se exhumaba. Sin embargo existían microestructuras que no encajaban con estos valores del paleoesfuerzo. En concreto se observó concentración de material insoluble a lo largo de foliaciones relictas dentro de blastos de calcita, subparalelas a la foliación principal (Fig. 4b) y abundancia de material insoluble concentrado tanto a lo largo de la migración de bordes de grano de calcita de los calco-esquistos de Punta Balandra (Fig. 4a) como a lo largo de los bordes de grano que de forma más grosera definen la foliación principal en los mármoles del Rincón (Fig. 4c).

Mediante imágenes de catodoluminiscencia fría obtenida por microscopía óptica (optical-CL), se pudo ver como en realidad las estructuras de disolución estaban asociadas a un proceso cataclástico previo al periodo en el que dominó la deformación plástica para desarrollar la foliación principal en los mármoles y calcoesquistos del Complejo de Samaná (Fig. 5). Con el estudio de las fábricas de los mármoles y calcoesquistos en este estadio, el presente trabajo de investigación se ha centrado en la caracterización del proceso cataclástico. El objetivo principal ha sido obtener información detallada del proceso cataclástico a partir del análisis de la distribución de tamaño de grano (GSD) realizado sobre imágenes de Optical-CL. Además en este trabajo se discute la interpretación de estos datos, junto con los datos adquiridos anteriormente (Fernández et al., 2012) en el contexto más general del proceso de exhumación del Complejo de Samaná.

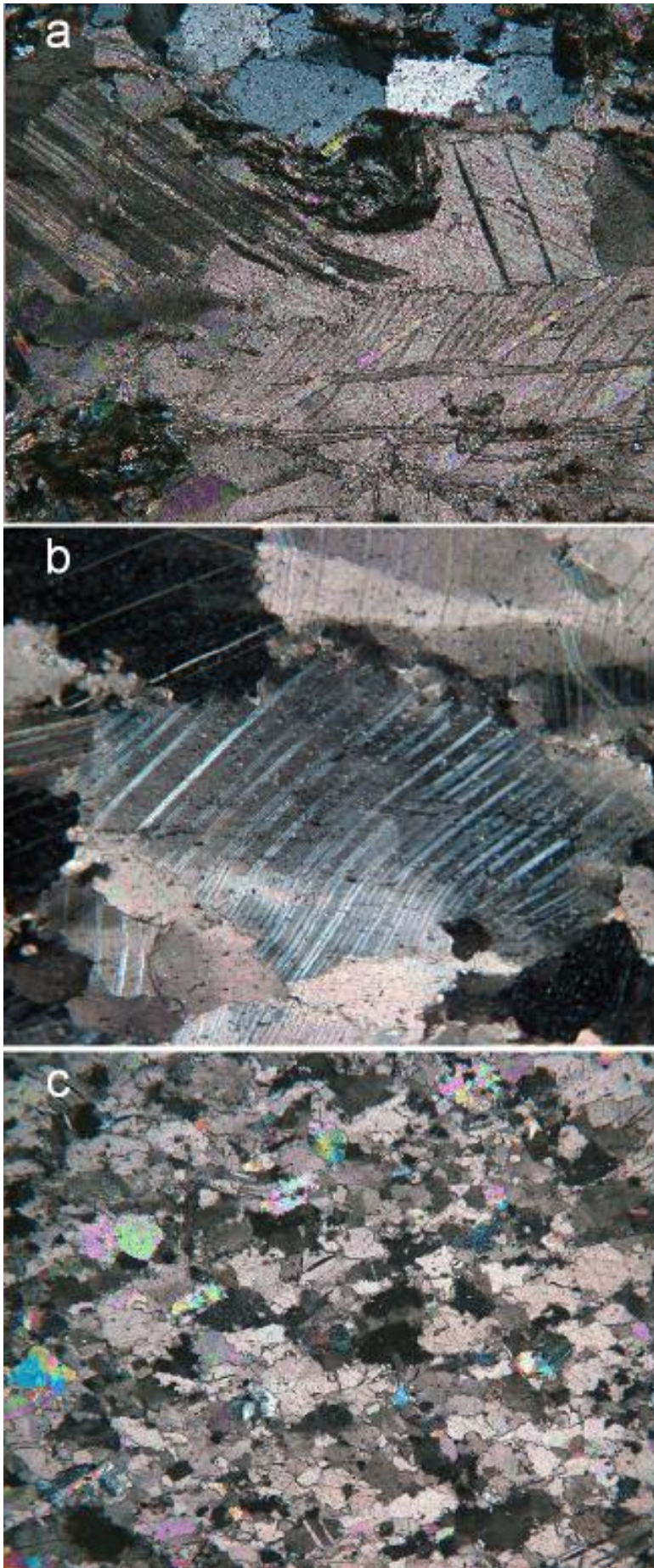


Figura 4: Imágenes de microscopía óptica en la que se muestran detalles significativos de microestructuras desarrolladas en los mármoles y calcoesquistos del Complejo de Samana. (a) blasto de calcita en un calcoesquisto de la unidad de Punta Balandra donde se observan tres familias de maclas con tipologías 1, 2 y 3 de Burkhard (1983) (Muestra JE119, ancho de la vista es de 1300 μm). (b) blasto de calcita en un calcoesquisto de la unidad de Santa Bárbara en el que se observan las maclas deformadas a lo largo bandas donde se concentra el material insoluble y que se disponen paralelas a la foliación principal (Muestra JE1062, ancho de la vista es de 1300 μm). (c) textura general de un mármol del Rincón donde se observa concentración de opacos resaltando las irregularidades de borde de grano de los cristales de calcita dispuestos paralelos a la foliación principal (Muestra JE 973, ancho de la vista es de 5000 μm).

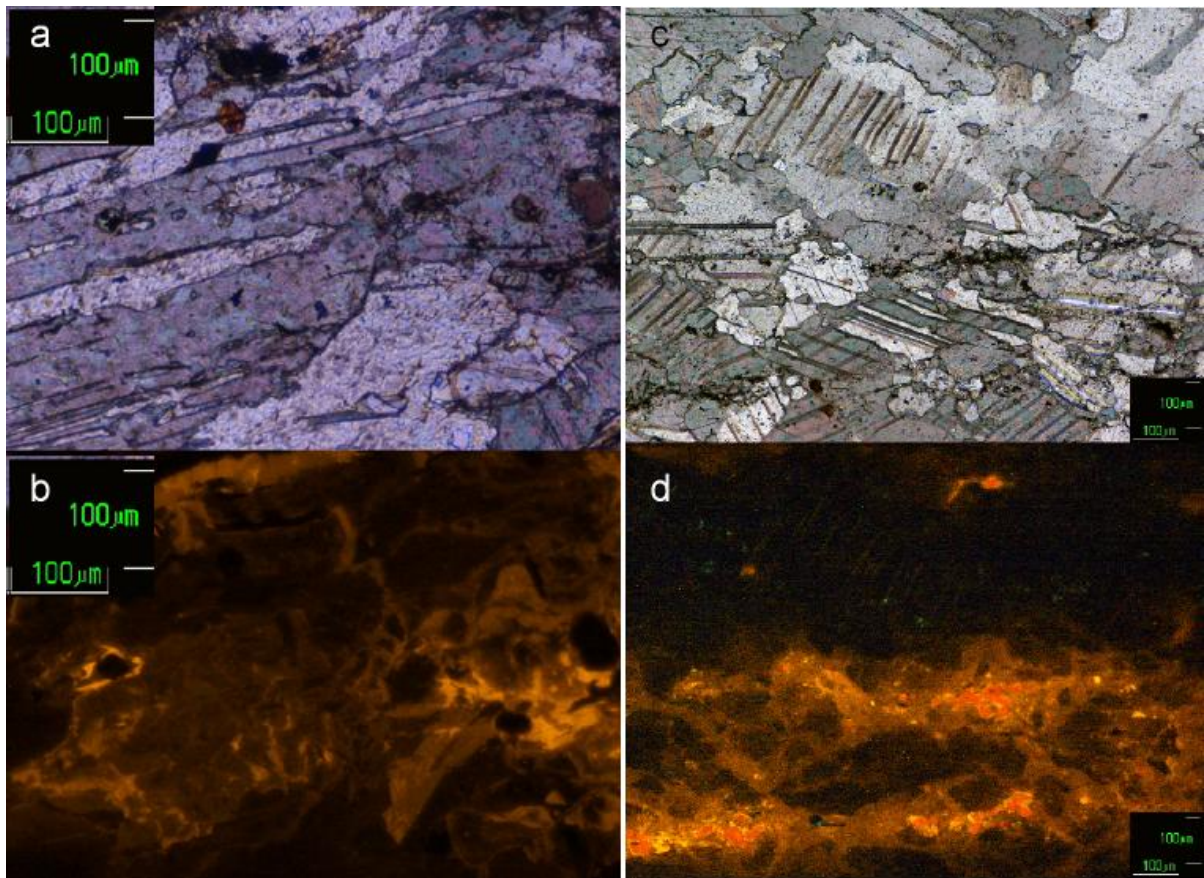


Figura 5: Imágenes de Optical-CL (b, d) en las que se muestran evidencias de cataclasis relictas. (a) detalle de agregados cataclásticos en zonas de sombra de presión de los granates de los calcoesquistos de Punta Balandra (Muestra JE119, ancho de la vista es de 640 μm). (c) detalle de agregados cataclásticos dispuestos a lo largo de la foliación principal en calcoesquistos de Santa Bárbara (Muestra JE1062, ancho de la vista es de 1300 μm).

Tabla I: Características de la distribución de tamaños de grano (GSD) y de las condiciones de deformación de las muestras consideradas en el estudio preliminar (ver explicación en texto). Se indica el tamaño de grano medio de las 2 fracciones finas ($f.f.$) más significativas, de los blastos de calcita ($h.g.$) y de su parámetro de forma ($\bar{S}$). Los valores de paleoesfuerzo calculados se refieren al máximo registrado según la incidencia de maclado (a) o al esfuerzo de fluencia calculado utilizando la $f.f.2$ (b). Las condiciones P - T máximas (M_1) y mínimas (M_2) durante las cuales se desarrolló la foliación principal (S_2) están tomadas de Escuder- Viruete et al. (2011b). Las unidades de tamaño de grano, paleoesfuerzo, P y T están en μm , MPa, GPa y $^{\circ}C$ respectivamente. Obsérvese que el paleoesfuerzo b de la muestra JE9059* corresponde a una fábrica desarrollada en un budín cuarzítico intercalado en un calcoesquistos y que su valor se calculó utilizando la calibración de Stipp y Tullis (2003).

Unid.	Muestra	Tamaño de grano			$\bar{S}$	Paleoesfuerzo		S_1		S_2	
		$h.g.$	$f.f.1$	$f.f.2$		a	b	P	T	P	T
UPB	JE9125	not hg	9 $\pm$ 3	16 $\pm$ 14			187 $\pm$ 63	1.9 $\pm$ 0.1	480 $\pm$ 15	1.6 $\pm$ 0.1	515 $\pm$ 10
UPB	JE9096	not hg	5 $\pm$ 4	21 $\pm$ 12			139 $\pm$ 15	2.0 $\pm$ 0.1	475 $\pm$ 25	1.4 $\pm$ 0.2	515 $\pm$ 15
UPB	JE9072	not hg	6 $\pm$ 5	14 $\pm$ 11			173 $\pm$ 48	?	?	1.5 $\pm$ 0.1	475 $\pm$ 25
UPB	JE119	68 $\pm$ 52	7 $\pm$ 4	23 $\pm$ 18	0.5	350 $\pm$ 31	158 $\pm$ 38	2.0 $\pm$ 0.1	475 $\pm$ 25	1.4 $\pm$ 0.2	515 $\pm$ 15
ESB	JE1062	151 $\pm$ 121	20 $\pm$ 17	51 $\pm$ 34	0.4	200 $\pm$ 31	79 $\pm$ 20	1.6 $\pm$ 0.05	375 $\pm$ 10	1.2 $\pm$ 0.05	400 $\pm$ 10
ESB	JE9059*	85 $\pm$ 74	9 $\pm$ 1	26 $\pm$ 17	0.5		30 $\pm$ 15	1.65 $\pm$ 0.1	400 $\pm$ 20	1.1 $\pm$ 0.1	450 $\pm$ 25
MR2	JE1022	38 $\pm$ 13			0.6			1.2 $\pm$ 0.1	325 $\pm$ 15	0.7 $\pm$ 0.05	335 $\pm$ 15
MR2	JE1055	60 $\pm$ 46	21 $\pm$ 15	33 $\pm$ 10	0.5	275 $\pm$ 31	123 $\pm$ 23	1.2 $\pm$ 0.1	325 $\pm$ 10	0.75 $\pm$ 0.1	330 $\pm$ 15
MR2	JE997	65 $\pm$ 55	18 $\pm$ 11	27 $\pm$ 11	0.5	260 $\pm$ 31	115 $\pm$ 14				
MR2	JE995	37 $\pm$ 24			0.7						
MR2	JE981	77 $\pm$ 56	15 $\pm$ 9		0.5	255 $\pm$ 31					
MR2	JE973	197 $\pm$ 127	39 $\pm$ 45	28 $\pm$ 11	0.4	170 $\pm$ 31	116 $\pm$ 13				
MR2	JE980	184 $\pm$ 136	45 $\pm$ 44	25 $\pm$ 10	0.4	220 $\pm$ 31	125 $\pm$ 13	1.0 $\pm$ 0.1	315 $\pm$ 10	0.55 $\pm$ 0.1	325 $\pm$ 15
MR1	JE1010	63 $\pm$ 48	17 $\pm$ 11	26 $\pm$ 11	0.5	320 $\pm$ 31	132 $\pm$ 20	1.1 $\pm$ 0.15	325 $\pm$ 15	0.7 $\pm$ 0.1	325 $\pm$ 15
MR1	JE994	65 $\pm$ 47	18 $\pm$ 14	32 $\pm$ 11	0.5	320 $\pm$ 31	123 $\pm$ 23	idem	idem	idem	idem
MR1	JE1039	76 $\pm$ 74	17 $\pm$ 10	27 $\pm$ 12	0.5	310 $\pm$ 31	132 $\pm$ 20	1.1 $\pm$ 0.15	325 $\pm$ 15	0.7 $\pm$ 0.1	325 $\pm$ 15
MR1	JE1025	53 $\pm$ 41	18 $\pm$ 13	29 $\pm$ 12	0.5	320 $\pm$ 31	123 $\pm$ 20				
MR1	JE1047	87 $\pm$ 78	19 $\pm$ 13	31 $\pm$ 10	0.4	275 $\pm$ 31	123 $\pm$ 20	1.0 $\pm$ 0.15	330 $\pm$ 10	0.7 $\pm$ 0.10	320 $\pm$ 15
MR1	JE975	72 $\pm$ 56	18 $\pm$ 17	23 $\pm$ 9	0.5	300 $\pm$ 31	158 $\pm$ 19	0.8 $\pm$ 0.15	320 $\pm$ 10	0.65 $\pm$ 0.1	300 $\pm$ 20
MR1	JE970	69 $\pm$ 56	16 $\pm$ 11	26 $\pm$ 11	0.5	300 $\pm$ 31	132 $\pm$ 20	idem	idem	idem	idem
MR1	JE987	72 $\pm$ 55	15 $\pm$ 10	27 $\pm$ 12	0.4	300 $\pm$ 31	132 $\pm$ 20	?	?	0.65 $\pm$ 0.1	300 $\pm$ 20

litosfera proto-Caribeña, rocas plutónicas y volcánicas relacionadas con el arco-isla Caribeño Cretácico y rocas depositadas en cuencas sedimentarias de antearco (Escuder-Virue, 2008a).

1.1.1 Unidades litoestratigráficas y sus condiciones metamórficas

El Complejo de Samaná ha sido dividido en cinco unidades litoestratigráficas separadas por contactos mecánicos (Fig. 2). Las facies metamórficas registradas en estas unidades han sido descritas por Escuder-Virue et al., (2011a, b) y de menor a mayor grado metamórfico son:

- **Filitas de Playa Colorado**, compuesta por filitas, metareniscas, esquistos cloríticos, metacarbonatos y chert, que afloran en una ventana tectónica en el sector NE del complejo. Las condiciones metamórficas de esta unidad van desde la facies esquistos verdes hasta paragénesis con fengita (Phg) y lawsonita (Lw) que indican alta *P* como es el caso de: Qtz+Phg₁+Chl₁+Lw+Ab+Hem en metapelitas (Escuder-Virue, 2008a, b).

- **Mármoles del Rincón**, constituida por tres sub-unidades litológicamente diferentes. Estas sub-unidades están definidas como: un nivel inferior de mármoles bandeados claros; calcoesquistos y filitas en los niveles superiores; y mármoles oscuros de grano fino en niveles intermedios. En general, todas las rocas poseen una fábrica plano-linear. Las condiciones metamórficas van desde condiciones de facies esquistos azules superior a facies de transición entre esquistos azules y los esquistos verdes. Algunas paragénesis características en **M₁**, según la litología son:

Marmol impuro: Cc+Dol+Qtz+Phg₁+Chl₁+Lw+Sph (Escuder-Virue, 2008a, b)

Metabasita: Act+Phg₁+Chl₁+Lw+Ab+Pmp+Sph (Joyce, 1991; Escuder-Virue, 2008a, b; Escuder-Virue et al. 2009)

Metapelita: Qtz+Phg₁+Chl₁+Lw+Ab+Sph+Hem (Escuder-Virue, 2008a, b)

- **Esquistos de Santa Bárbara**, unidad esencialmente formada por micaesquistos, calcoesquistos y cuarzoesquistos, con intercalaciones de mármoles. Los niveles estructurales más altos de esta unidad registran un pico metamórfico a unas condiciones *P-T* de 15-17 kbar a 400-450°C. La asociación mineral correspondiente a la facies de los esquistos azules durante el metamorfismo **M₁** son según el tipo litológico las siguientes:

Metapelita: Qtz+Phg₁+Chl₁+Mn-Grt+Ctd+Lw+Pg₁+Rt+Sph (Joyce, 1991; Escuder-Virue, 2008a, b)

Marmol impuro: Cc/Arag+Dol+FeGln+Qtz+Phg₁+Chl₁+Pg₁+Lw (Escuder-Virue, 2008a, b)

Metabasita: FeGln+Ep+Phg₁+Chl₁+Lw+Rt+Sph+Pg₁ (Gonçalves et al., 2000; Escuder-Virue, 2008a, b)

Durante el metamorfismo retrógrado (**M₂**) se produce la transición de condiciones de la facies esquistos azules a la facies de esquistos verdes con asociación paragenéticas del tipo:

Metapelita: Qtz+Phg₂+Pg₂+Sph+Ep+Ab+Bt+Hem (Escuder-Virue, 2008a, b)

Mármol impuro: Cc/Arag+Dol+Qtz+Phg₂+Chl₂+Pg₂+Ep+Bt (Escuder-Virue, 2008a, b)

Metabasita: Act+NaCaAmph+Ep+Phg₂+Chl₂+Sph+Pg₂ (Escuder-Virue, 2008a, b)

En los niveles estructurales inferiores el pico metamórfico en progradación alcanza unas condiciones *P-T* de 12-16 kbar y 375-400°C dentro de la facies esquistos azules, con una asociación mineral en **M₁**:

Metapelita: Qtz+Phg₁+Chl₁+Fe-MgCar+Lw+Ab+Pg₁+Sph+Hem+Ilm (Joyce, 1991; Escuder-Virue, 2008a, b)

Mármol impuro: Cc/Arag+Dol+Qtz+Phg₁+Chl₁+Pg₁+Lw+Sph (Escuder-Virue, 2008a, b)

Metabasita: Act+Phg₁+Chl₁+Lw+Ab+Pmp+Sph (Joyce, 1991; Escuder-Virue, 2009)

La asociación correspondiente a **M₂** en el metamorfismo retrógrado evoluciona hasta facies esquistos verdes con paragénesis del tipo:

Metapelita: Qtz+Phg₂+Pg₂+Sph+Ab+Hem (Escuder-Virue, 2008a, b)

- **Unidad de Punta Balandra**, es litológicamente heterogénea y está constituida por una alternancia de mármoles, calcoesquistos y micaesquistos con granate, con intercalaciones y bloques de eclogitas, esquistos azules con granate, onfacita y glaucófana. De acuerdo con Escuder-Virue et al. (2008a, b; 2009) el pico metamórfico (**M₁**) medido en un bloque eclogítico, registra una *P-T* de 22-24 kbar y 610-626°C. Fuera de este bloque las condiciones *P-T* calculadas por estos autores alcanzaron los 19-21 kbar y 450-500°C. En el metamorfismo retrógrado **M₂** las condiciones *P-T* fueron de 8-12 kbar y 400-350°C y posteriormente retrogradaron hasta la facies de los esquistos verdes (**M₃**) con unas condiciones *P-T* de 4-8 kbar y 400-350°C, de acuerdo con las siguientes asociaciones paragenéticas:

M₁

Metapelita: Qtz+Phg₁+Chl₁+Grt+Ctd+Lw+Rt+Pg₁ (Joyce, 1991; Escuder-Virue, 2008a, b)

Mármol impuro: Cc/Arag+Dol+Grt+Qtz+Phg₁+Chl₁+Pg₁+Lw (Escuder-Virue, 2008a, b; Escuder-Virue et al., 2009)

Metabasita: Grt+Omp+Phg₁+Chl₁+NaAmph₁+Lw+Rt+Pg₁ (Joyce, 1991; Gonçalves et al., 2000; Escuder-Virue et al., 2009)

Metabasita en mélange: Grt+Omp+Phg₁+Rt (Escuder-Virue et al., 2009)

M₂

Metabasita: Ep+Clz+Phg₂+Chl₂+NaAmph₂+Pg₂+Cc/Arag+Rt+Sph+Ilm (Escuder-Virue et al., 2009)

M₃

Metabasita: Ep+Clz+Phg₃+Chl₃+NaAmph₃+Cc+Sph+Ilm (Escuder-Virue et al., 2009)

- **Mármoles de Majagual-Los Cacaos**, compuesta por mármoles y mármoles dolomíticos, masivos y bandeados, calcoesquistos y filitas. A pesar del aumento de condiciones *P-T* según se asciende en la serie estratigráfica, en estas rocas el pico metamórfico se da a unas condiciones de 9-11 kbar y 300-350°C dentro de condiciones de la facies de los esquistos verdes. La asociación mineral en esta unidad son del tipo:

M₁

Mármol impuro: Cc/Dol+Qtz+Phg₁+Chl₁+Ab+Lw (Joyce, 1991; Escuder-Virue et al., 2008a, b)

Metapelita: Qtz+Phg₁+Chl₁+Lw+Cc (Escuder-Virue et al., 2011b)

M₂

Mármol impuro: Cc/Dol+Qtz+Phg₂+Chl₂+Ab (Escuder-Virue et al., 2011b)

Metapelita: Qtz+Phg₂+Chl₂+Ab+Sph+Cc (Escuder-Virue et al., 2011b)

Sobre este basamento se disponen discordantemente conglomerados y depósitos carbonatados del Paleoceno/Eoceno. Finalmente, una nueva sucesión de conglomerados y sedimentos carbonatados pleistocenos y depósitos recientes se disponen sobre esta serie. Los depósitos Holocenos evidencian la importante actividad tectónica en la actualidad (Draper et al. 1994; Escuder-Virue et al., 2010; 2011a).

1.1.2 La estructura y su relación con el metamorfismo

La compleja evolución del Complejo de Samaná ha sido objeto de numerosos estudios (Joyce, 1991; Gonçalves et al., 2000; Escuder-Virue y Pérez-Estaún, 2004; Escuder-Virue et al., 2004; Escuder-Virue y Pérez-Estaún, 2006; Pérez-Estaún et al., 2007; Escuder-Virue et al., 2011a, b; Escuder-Virue y Pérez-Estaún, 2013).

Escuder-Virue et al., (2011b), define cinco eventos tectonometamórficos para las unidades definidas en el Complejo de Samaná:

Evento D₁, está relacionado con la subducción y un metamorfismo progrado de alta *P* (M₁). A escala mesoscópica, la aparición de pliegues isoclinales intrafoliares y disruptados se puede relacionar con esta fase. En este evento se deforma la fábrica primaria S₀ (alternancia de mármol y calcoesquistos) y aparecen venas tempranas o segregaciones de cuarzo y calcita deformadas por la foliación S₁. A escala microscópica, la foliación S₁ se define por la asociación mineral formada en M₁. Esta foliación S₁ se preserva plegada en los microlitones dentro de la foliación S₂. Los granates idioblásticos dentro de la unidad de Punta Balandra preservan núcleos con inclusiones sigmoidales y con una estructura en forma de bola de nieve siendo los cristales de cuarzo, lawsonita, cloritoide, rutilo y grafito los que preservan la foliación S₁ (Fig. 7). También se preservan agregados de grano fino de clinozoisita, paragonita y fengita como pseudomorfos rectangulares de lawsonita formada según la orientación S₁.

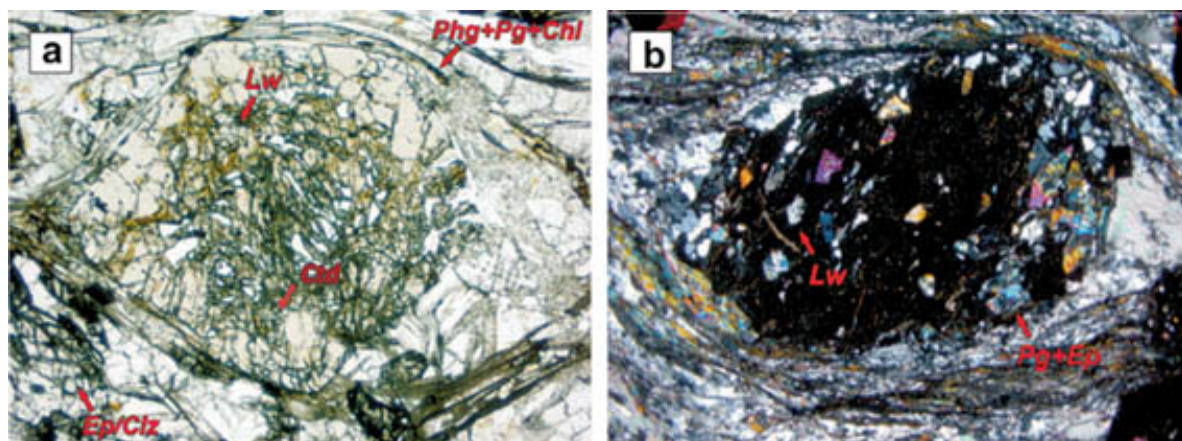


Figura 7: (a) Granate idioblástico (3.5mm $\varnothing$) zonado con respecto a las inclusiones minerales, en el que se pueden ver inclusiones formando trazas sigmoidales correspondientes a la foliación S₁ de cuarzo, lawsonita, cloritoide, rutilo y grafito en el núcleo, pasando a un ritmo pobre en inclusiones en el exterior. La foliación S₂ definida por la lineación de fengita, paragonita, clorita, rutilo, titanita y calcita envuelve el granate. Muestra perteneciente a un calcoesquisto de la Unidad de Punta Balandra (nícoles paralelos). (b) Porfiroblasto de granate syn-D₂ con inclusiones de lawsonita en el núcleo y pseudomorfos de epidota-paragonita romboidal sustituyendo la lawsonita. Muestra perteneciente a la unidad Esquistos de Punta Balandra (nícoles cruzados). Tomado de Escuder-Virue, 2011b.

Evento D₂, se caracteriza por una cizalla heterogénea que se forma durante la construcción de la cuña de acreción en la colisión en el que se produce el desarrollo de la foliación principal y más penetrativa que presentan todos los mármoles y calcoesquistos muestreados. Este evento se reequilibra durante el metamorfismo retrógrado (M₂) en facies esquistos azules y, posteriormente en la facies esquistos verdes (M₃). Durante estos dos estadios del metamorfismo retrógrado, las láminas tectónicas fueron plegadas y emplazadas

hacia el N en una secuencia inversa. Este evento duró hasta el Mioceno inferior. A medida que se asciende hacia los niveles estructurales más altos, la intensidad del plegamiento y de la cizalla en los flancos de los pliegues aumenta (Escuder-Viruet et al., 2011b). Los pliegues son asimétricos con flancos normales largos y flancos inversos cortos. Algunos de los flancos cortos están cortados por cabalgamientos. El desarrollo de la esquistosidad S_2 está restringida a las zonas de charnela de los pliegues y las superficies dúctiles de cabalgamiento. Estos pliegues deforman a la foliación S_1 y son sincinemáticos con respecto a la foliación principal S_2 . Exceptuando algunos mármoles de la unidad Mármoles del Rincón, la foliación S_2 es una fábrica penetrativa. En metapelitas y calcoesquistos de la unidad de Santa Bárbara la foliación S_2 se define por el crecimiento orientado durante M_2 de clorita, fengita, paragonita, cuarzo y en parte de calcita/dolomita, albita, biotita, glaucofana, actinolita, rutilo y titanita, o por un bandeo composicional de una anchura que varía entre 0,1-2,5 mm. En ocasiones, sobre los niveles estructurales más altos de la unidad de Santa Bárbara se observa que la foliación se produce en condiciones de aumento de temperatura controlando la asociación paragenética que define la transición entre la facies esquistos azules con lawsonita a facies esquistos azules con epidota. La epidota y glaucofana son reemplazadas por la asociación de la facies esquistos verdes de albita, tremolita y clorita en un evento tardi- S_2 (M_3).

La mayor parte de los indicadores cinemáticos están asociados con este estadio tardío en el desarrollo de la foliación tectónica principal, como son a la escala de microscopio las sombras de presión asimétricas alrededor de granates, titanita, glaucofana, cloritoide, calcita y albita, las foliaciones oblicuas y los clivajes tipo S-C definidos en agregados de cuarzo y calcita. A la escala de afloramiento los indicadores cinemáticos son la asimetría de los pliegues isoclinales y de los boudins. Además, en las superficies de los cabalgamientos atribuibles a este estadio de la deformación se observa un incremento gradual de la cizalla simple a la vez que se produce una retrogradación de esquistos azules inferior a la facies de los esquistos verdes. La lineación definida por fengita, clorita, Fe-glaucofana, winchita, epidota, cuarzo y calcita, en los cabalgamientos basales de Punta Balandra y Santa Bárbara muestra una orientación que varía de NNW a ENE definida por un lineamiento de fengita y Na-anfibolita. Restaurado la deformación tardía transpresiva se deduce una dirección de emplazamiento hacia el NNE de estas láminas.

Evento D_3 , es una deformación no penetrativa que produce un plegamiento abierto de amplitudes de escala kilométrica. Estos pliegues presentan ángulos entre flancos variables, desde abiertos a apretados. Los planos axiales son subverticales o ligeramente vergentes al NE. A menudo muestran una geometría tipo kink a distintas escalas que van desde tamaño centimétrico a kilométrico. Los ejes se orientan con una disposición que varía de NW-SE a WNW-ESE. Estas estructuras se observan mayormente en la unidad de Santa Bárbara, mientras que en Mármoles del Rincón y la unidad Majagual-Los Cacaos esta deformación sólo pliega ligeramente la foliación principal S_2 . A escala de afloramiento, los pliegues formados en esta fase presetan una lineación (L_3) paralela al eje del pliegue, en ocasiones asociada a un clivaje espaciado subvertical. A escala regional, los pliegues son vergentes al

NE. Las relaciones microestructurales indican que la deformación D_3 se produjo bajo condiciones de transición frágil-dúctil. D_3 y en condiciones de facies esquistos verdes.

Evento D_4 , se trata de una deformación extensional tardía registrada por fallas y zonas de cizalla, y plegamiento sub-horizontal. Las estructuras se superponen a los pliegues formados durante D_3 y se dan preferentemente en las unidades de Punta Balandra y Santa Bárbara, lo que sugiere que estas unidades registran una historia deformacional ligada al proceso de exhumación más compleja. Las zonas de cizalla frágil-dúctil y las fallas tienen dos orientaciones dominantes. Sus trazas se disponen N-S y NNE-SSW y sus planos tienen una inmersión 25W y 80E, respectivamente. La segunda familia presenta unas trazas dispuestas W-E y NW-SE y sus planos tienen una inmersión de 60N y 60SW, respectivamente. A escala de afloramiento las zonas de cizalla presentan un clivaje oblicuo de tipo S-C' de escala que varía entre centimétrica a métrica. Sólo se desarrollan en rocas con fuerte anisotropía planar, como micaesquistos y producen la recrystalización de cuarzo y/o calcita. A escala microscópica, se observa un clivaje de crenulación y el desarrollo de *kink bands*. Además se observan concentraciones de opacos, sericita y clorita en bandas de disolución formando un clivaje espaciado (S_4).

Evento D_5 , está asociado a la deformación que se produce como consecuencia del movimiento siniestro de la falla Septentrional y del sistema de fallas inversas asociadas a la tectónica de convergencia oblicua. Se desarrolla desde el Mioceno hasta la actualidad. Una característica común para estos eventos tardíos es el comportamiento frágil de los mármoles. Las estructuras frágiles identificadas son fallas tipo strike slip sinistras y fallas normales tardías.

METODOLOGÍA y RACIONALIDAD DEL MUESTREO

Se han estudiado las fábricas y microestructuras desarrolladas en los calcoesquistos y mármoles del Complejo de Samaná mediante técnicas de microscopías óptica y electrónica de barrido. El objetivo principal de este trabajo es investigar un proceso cataclástico relictos producido al comienzo de la exhumación de estas rocas carbonatadas de alta P y baja T . Fernández et al. (2012) investigó 21 muestras (Tabla I) representativas de los distintos niveles estructurales para interpretar el comportamiento mecánico de la calcita durante el proceso tectónico de exhumación D_2 . Además las muestras utilizadas en este trabajo han permitido comparar las diferencias entre las fábricas desarrolladas a lo largo de un gradiente retrógrado desde calcoesquistos y mármoles metamorfizados en condiciones de la facies de las eclogitas, hasta la facies de las anfibolitas. En esta investigación preliminar se observó que sólo mediante imágenes CL se podían identificar las microestructuras cataclásticas y que éstas sólo estaban preservadas en las dos unidades que provenían de mayor profundidad. En concreto, 4 muestras de calcoesquistos correspondientes a la unidad de Punta Balandra (muestras JE9125, JE9096, JE9072 y JE119) y una muestra de los Esquistos de Santa Bárbara (JE1062). El muestreo se completó con un mármol de Punta Balandra (muestra 02JE120) y tres mármoles de Santa Bárbara (muestras JE9046A, JE137 y JE9115) para obtener más microestructuras en las que se pudiera analizar el proceso cataclástico relictos. Todas las muestras se han situado en un mapa geológico detallado del Complejo de Samaná (Fig. 8a).

Se ha reconstruido una sección a lo largo de la dirección SSW-NNE, de acuerdo con los datos estructurales de la foliación S_2 y la lineación de orientación mineral (Fig. 8b). Todas las muestras se han situado de forma tentativa sobre la estructura interpretada por Escuder-Virute et al., (2011b) en el corte de la Fig. 8c. La estructura general muestra a la foliación S_2 plegada en pliegues asimétricos de vergencia NNE y cortados por dos zonas de cizalla que separan las tres unidades estudiadas de acuerdo con una secuencia inversa. Así, las unidades de más alto grado metamórfico (M_1) se encuentran sobre las unidades que progresivamente hacia el NNE registran menor grado. Todas las muestras están orientadas y fueron cortadas en secciones XZ , paralelas a la orientación mineral que produce el desarrollo de la fábrica sobre el plano de foliación S_2 (dirección X) y perpendicularmente a dicho plano (dirección Z). Además se ha marcado la polaridad de la muestra de acuerdo con la estructura mayor. Siguiendo este sistema de referencia externo (XYZ) se han proyectado todos los datos de orientación cristalográfica preferente (Fig. 3).

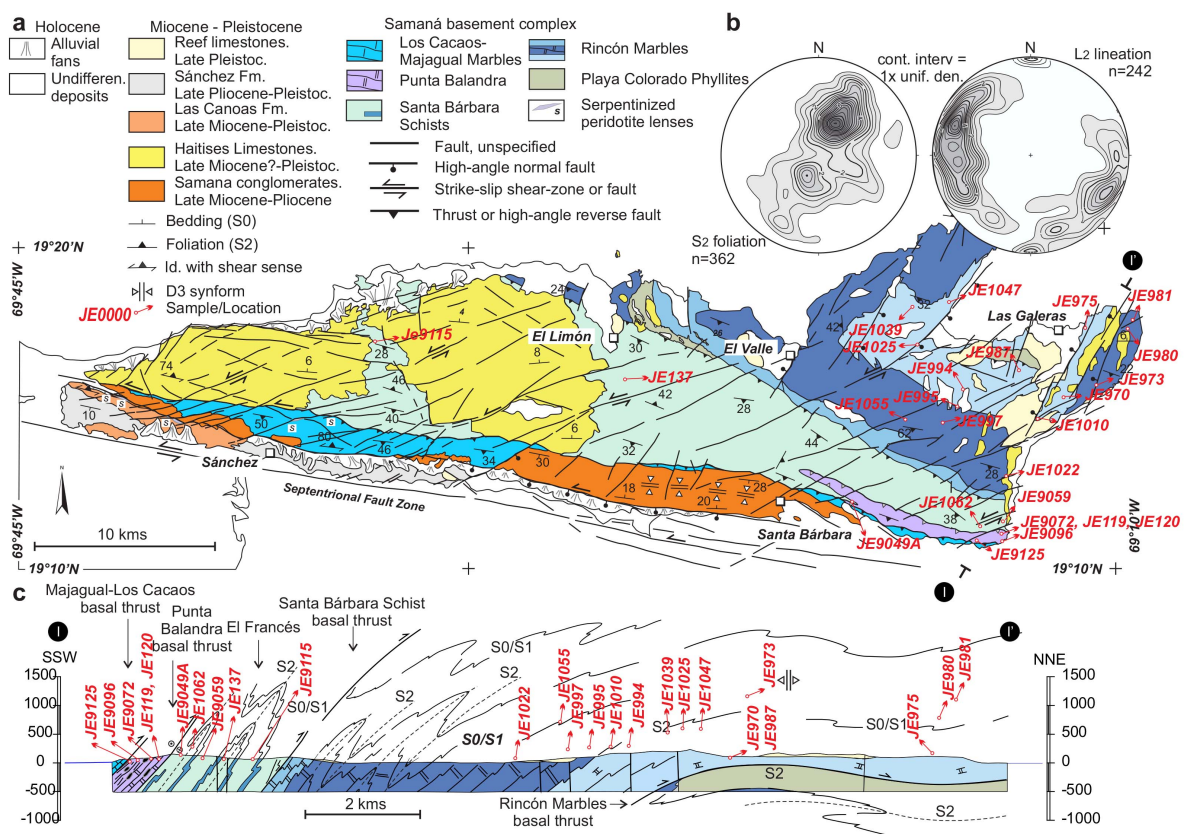


Figura 8: (a) Mapa geológico de la Península de Samaná y (c) reconstrucción de una sección a lo largo de la traza I (SSW)-I' (NNE) (modificado de Escuder-Viruet et al., 2011b). Se sitúan las muestras utilizadas en el estudio microtectónico. (b) Las proyecciones estereográficas de los polos de los planos de foliación S_2 y de las lineaciones de orientación mineral son equiareales y los contornos de densidad representan valores regulares del 1% del área total.

2.1 Cribado del muestreo

Aunque las 15 muestras de la unidad Mármol del Rincón han desarrollado fábricas plano-lineares S_2 y tienen evidencias que indican que han sufrido deformación plástica acomodada por recristalización dinámica (Tabla I) durante este proceso, cuando se han examinado en microscopía CL tienen muy poca luminiscencia y en consecuencia sus imágenes no aportan nueva información. En el nivel superior de esta unidad (muestras MR2 de la Tabla I) se han muestreado dos mármoles micríticos (muestras JE1022 y JE995) que aunque tenían una fábrica S_2 bien desarrollada a la escala de afloramiento, ésta desaparecía al microscopio presentando una fábrica equigranular. Su análisis composicional semicuantitativo reveló que el carbonato era dolomita equigranular, y que los cristales de dolomita idiomorfos destruían completamente la fábrica S_2 previa (Fig. 9). Otras 2 muestras de las Unidades de Santa Bárbara y de Punta Balandra fueron también descartadas porque la calcita aparecía sólo como una fase minoritaria.

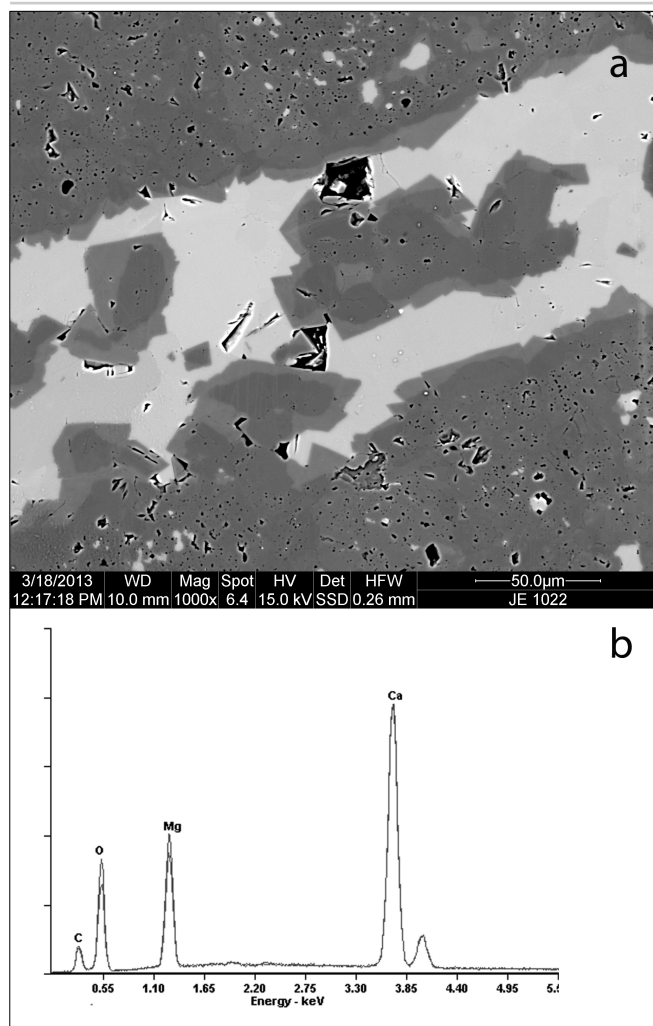


Figura 9: (a) Imagen ESEM de electrones secundarios de la muestra JE1022, en la que se ve la textura granoblástica de cristales dolomíticos pseudomorfizando la textura previa. (b) Perfil composicional de los bordes de los cristales idénticos en los que se identifican con claridad el Ca y el Mg de los cristales dolomíticos.

Consecuentemente, la investigación de este trabajo se ha centrado en el análisis de 8 muestras (Tabla II, Fig. 8). La fábrica de forma y de la distribución de tamaños (GSD) de calcitas que se desarrollaron durante todo el proceso de exhumación retrógrado ha sido estudiada utilizando imágenes obtenidas por microscopía óptica convencional (OM) y comparadas con imágenes de las mismas muestras obtenidas con microscopía óptica de catodoluminiscencia (Optical-CL), donde se han podido apreciar las fábricas cataclásticas relictas.

2.2. Métodos analíticos

Las imágenes de microscopía óptica convencional fueron realizadas con una cámara digital modelo **Leica DC500** montada sobre el ocular de un microscopio petrográfico **Leica** de luz transmitida polarizada modelo **Laborlux 12 Pol**. Para cada muestra se adquirieron una cascada de entre 4 y 9 imágenes para posteriormente ensamblarlas en mosaico. Se montaron mosaicos de imágenes tomadas con objetivo x5 aumentos, dentro de las cuales se trabajaron áreas más pequeñas con fotomontajes de imágenes tomadas con objetivo x10 aumentos. Además en 6 muestras (Tabla II) se realizaron mosaicos de imágenes Optical-CL obtenidas

con un microscopio óptico equipado con un equipo de catodoluminiscencia ***Technosyn Cold Cathodoluminescence CL8200 MK5*** especialmente adecuado para rocas carbonatadas donde generalmente se capta la luminiscencia que produce el Mn. El equipo trabajó en vacío, con una fuente de intensidad 500-600 μA y un voltaje 15 keV de aceleración. Los mosaicos fueron ensamblados utilizando los programas ***Photoshop CS4 (64 bits)*** de *Adobe*. Con este programa también se trabaja el contraste más adecuado de las imágenes Optical-CL para la diferenciación de los bordes de los cristales de calcita de luminiscencia diferente. Así si los cristales de calcita tienen contenido alto de Fe y/o bajo de Mn, tienen luminiscencia baja (Fig. 10). Las variaciones composicionales del carbonato pueden venir determinadas por cambios en el quimismo y/o del pH del fluido mineralizante durante los procesos diagenéticos (Sommer, S.E, 1969), pero también se pueden producir por cambios metasomáticos durante un proceso de exhumación.

Unidad	Muestra	Coordendas		Prueba
UPB	JE9096	-69,22119	19,18381	CL/OM
UPB	JE9072	-69,22437	19,18641	CL/OM
UPB	JE119	-69,22433	19,18661	CL/OM
UPB	02JE120	-69,22429	19,18638	CL/OM
ESB	JE1062	-69,23483	19,18981	CL/OM
ESB	JE9115	-69,55808	19,29865	OM
ESB	JE137	-69,42814	19,27259	OM
ESB	JE9049A	-69,29153	19,19584	CL/OM

Tabla II: Muestras sobre las que se ha realizado el análisis de la fábrica de forma y de la distribución de los tamaños de grano de las microestructuras relictas del proceso cataclástico. UPB, unidad Punta Balandra, ESB, Esquistos de Santa Bárbara. Se señalan las muestras nuevas en rojo que completan la colección analizada en los estudios previos preliminares (Fernández et al., 2012). Se indican las coordenadas de localización y el tipo de imágenes sobre las que se realizaron los análisis: CL (imágenes catodoluminiscencia óptica) y OM (imágenes de microscopía óptica convencional).

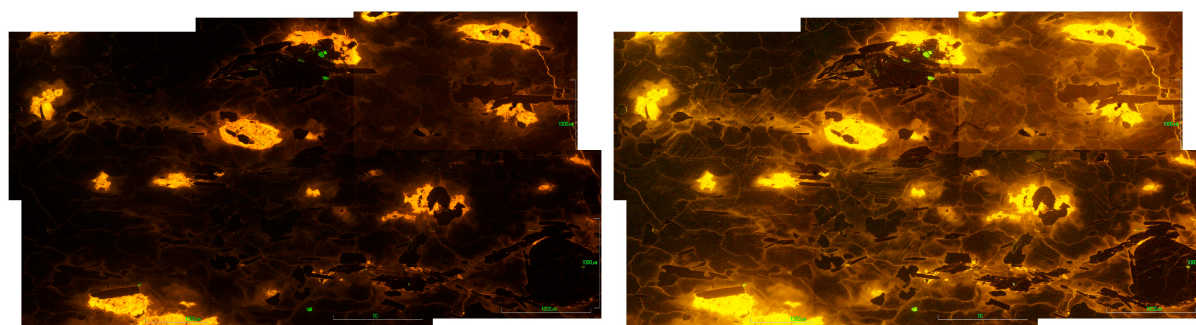


Figura 10: Mosaico de imágenes de CL de la muestra JE120 antes (izquierda) y después (derecha) de procesar el contraste de imagen con el programa ***Photoshop CS4 (64 bits)*** de *Adobe*.

Las imágenes adquiridas por estas técnicas de microscopía OM y Optical-CL permiten discriminar un rango de tamaños de grano desde radios (r) $400 \mu\text{m} > r > 2 \mu\text{m}$. Después de

dibujar manualmente los bordes de grano de cada una de las imágenes analizadas con ayuda del programa **Photoshop CS4 (64 bits)**, con el objeto de evitar confundir bordes de grano con bordes de planos de macla (Fernández et al., 2011). Las imágenes se guardan en ficheros tipo .TIFF como imágenes blanco y negro de 8 bits. Se ha utilizado el software libre de procesamiento de imágenes **ImageJ** (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>) para obtener los parámetros básicos del análisis GSD, tales como el área del grano (A_i), perímetro (P_i), centroide, eje mayor y menor de la elipse mejor inscrita, así como su orientación. Siempre se utilizaron imágenes de fábricas con resolución suficiente como para poder dibujar la irregularidad de borde de grano y las fracciones de tamaño de grano más finas de forma precisa.

Los diagramas GSD han permitido diferenciar las fracciones de tamaños que caracterizan a la fábrica analizada. Las fracciones se caracterizan por la frecuencia en la que aparece un determinado rango de tamaños y por el porcentaje de área que ocupa ese rango de tamaños de grano respecto del total del área de la fábrica analizada. Así se pueden obtener distribuciones normales, formadas por una única población, o complejas, constituidas por diferentes fracciones o distribuciones normales. En los casos de distribuciones complejas se toma la fracción normal con igual porcentaje de área y de frecuencia como la fracción que corresponde a la población de granos de tamaño medio y el resto de las fracciones se separan como fracciones de tamaños más fina (*f.f.*) o fracciones más gruesas (*f.g.*) que se interpretan como poblaciones de nuevos cristales o cristales deformados por distintos mecanismos. Para cada distribución normal se calculó el tamaño medio (media lineal) y su variación como desviación estándar. Se calculó también el radio equivalente (r_i), donde $r_i = \sqrt{(A_i + P_i)/\pi}$ y además se caracterizó cada fracción con un parámetro de forma (S), donde $S = (4\pi A_i)/P_i^2$. Este parámetro permite la cuantificación de la irregularidad del borde de grano (Fernández et al., 2005) y su valor puede variar entre 0 y 1. Los valores de S próximos a 0 representan bordes de grano más irregulares que los valores que tienden a 1 que representan bordes de granos esféricos o elípticos. En los diagramas de forma se han proyectado el parámetro S respecto a la elipticidad (relación axial de la elipse inscrita en cada grano). Este diagrama permite caracterizar cuantitativamente a las diferentes fracciones identificadas en los diagramas GSD y se ha utilizado como criterio para interpretar, junto con las microestructuras observadas, a las distribuciones normales (fracciones) de tamaño de grano diferenciadas.

RESULTADOS

3.1 Descripción petrográfica de las imágenes OM

Se hace una descripción petrográfica de las imágenes OM para caracterizar la fábrica y microestructuras y después se analizan cuantitativamente las fábricas mediante el análisis GSD.

3.1.1 Esquistos de Santa Bárbara

JE9049A: Se trata de un mármol esparítico intensamente foliado (Fig. 11). Está formado mayoritariamente por calcita (<90% modal), aunque de forma aislada se puede observar también fengita (5-3% modal), cuarzo, albita o clorita y abundante material opaco. La foliación S_2 la definen los cristales deformados de calcita. Generalmente la calcita tiene una relación de aspecto próxima a 10, en la que los cristales están intensamente maclados. La irregularidad de los bordes de calcita está definida fundamentalmente por el espaciado y la tipología de las maclas. Éstas son de tipo I, II y III según la clasificación de Burkhard (1993). Las de tipo I son más abundantes que las de tipo II y éstas que las de tipo III; y en las calcitas que aparecen las de tipo III generalmente podemos observar también de los otros dos tipos. El espaciado de la foliación varía en función de la anchura de los cristales de calcita (entre 100 μm y 50 μm). Las fases minoritarias aparecen en la textura marmórea de forma aislada, tales como cuarzos equigranulares dispersos y filosilicatos orientados. Los opacos se distribuyen paralelos a la foliación y se presentan concentrados en bandas. En detalle se puede observar que los opacos se distribuyen bordeando los cristales de calcita y en ocasiones dentro de los mismos bordeando las paredes de las maclas de tipo II y III.

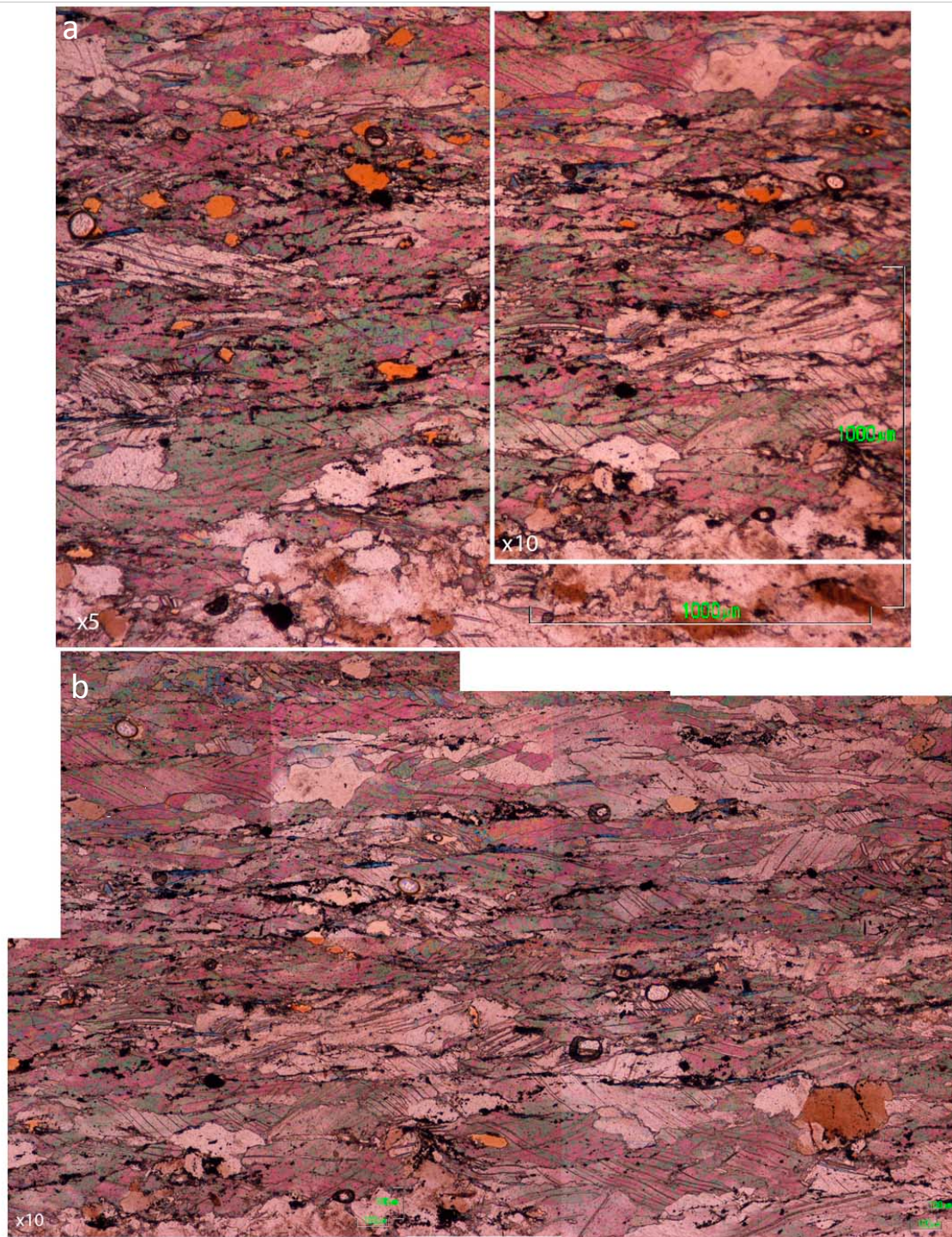


Figura 11: Mosaico de imágenes adquiridas con OM (nicoles cruzados) de la muestra JE9049A, con oculares x5 (a) y x10 (b). Se señala en el mosaico x5 la superficie que corresponde a la ampliación x10.

JE137: El mármol esparítico está formado por cristales de calcita que definen una débil orientación preferente (Fig. 12). Los cristales de mayor tamaño definen una fábrica granoblástica. Una fracción de cristales de menor tamaño se dispone bordeando estos cristales y en ocasiones entre la junción de los fenoblastos de calcita. Las calcitas de la fracción de mayor tamaño tienen bordes irregulares relacionados con la migración de bordes de grano y procesos tardíos de recrystalización estática. En los cristales mayores se observan con

frecuencia al menos dos sistemas conjugados de maclas de tipo I (Burkhard, 1993), mientras que los tipos II y III de maclas raramente se observan. Los opacos (<2% modal) aparecen de manera dispersa dentro de los cristales. Como particularidad se observa una banda estilolítica tardía (en la parte superior de la imágenes x5 y x10 de la Fig. 12), dispuesta sub-paralela a la foliación principal S_2 que está definida débilmente por la orientación preferente de la fracción de calcitas de tamaño mayor.

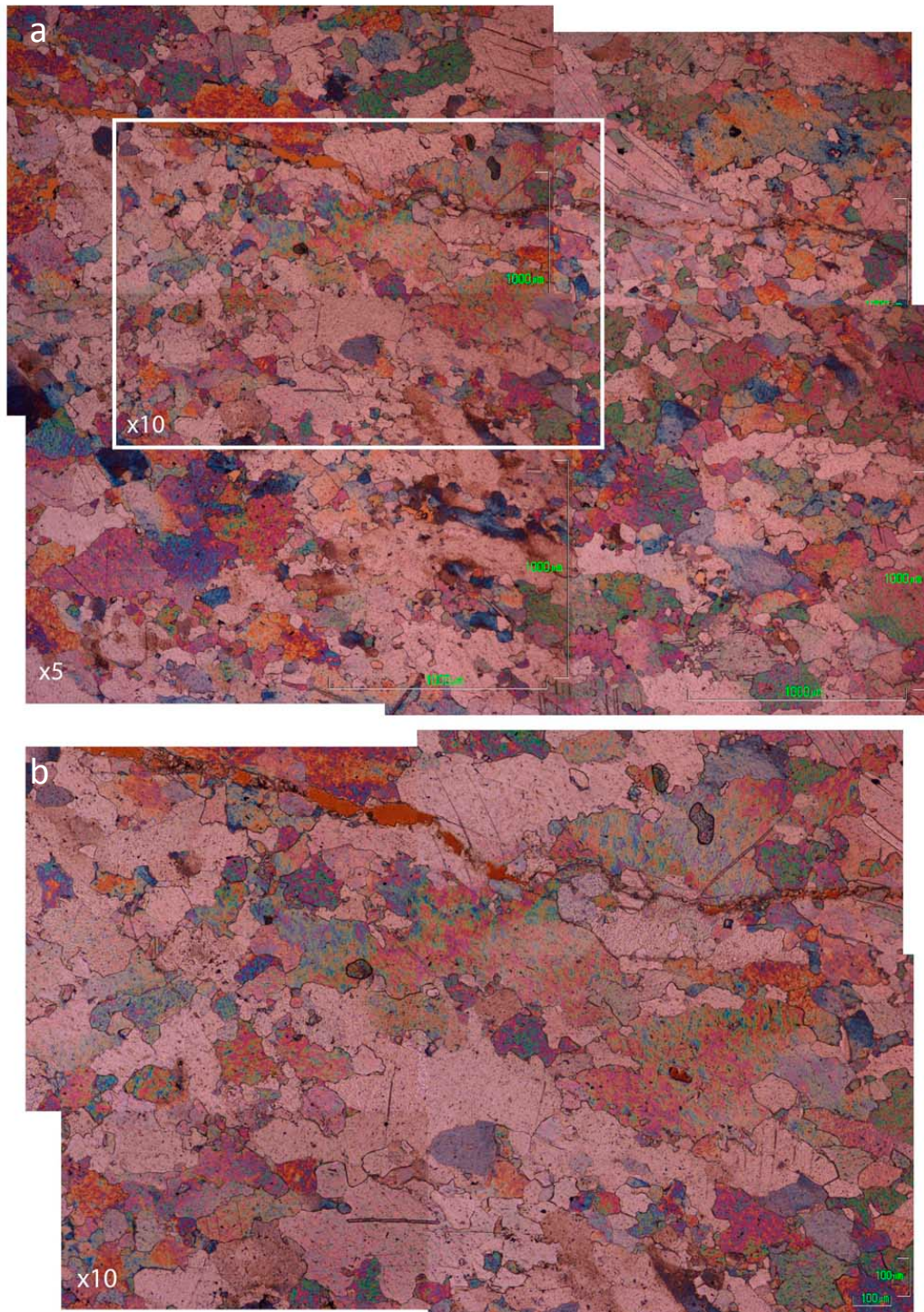


Figura 12: Mosaico de imágenes adquiridas con OM (nicoles cruzados) de la muestra JE137, con oculares x5 (a) y x10 (b). Se señala en el mosaico x5 la superficie que corresponde a la ampliación x10.

JE9115: Mármol esparítico (>90% modal, calcita). Los escasos minerales accesorios, tremolita y albita aparecen junto a los opacos definiendo un bandeoado composicional restítico dispuesto paralelo a la foliación S_2 . Los fenoblastos de calcita tienen una orientación oblicua ($\approx 30^\circ$) del tipo S-C (Fig.13). Sobre estos cristales se desarrollan maclas de tipo I (Burkhard, 1993), observándose con frecuencia dos familias. Ocasionalmente algunos cristales maclados están ligeramente deformados con posterioridad al desarrollo de las maclas. La irregularidad de borde de grano viene definida por la migración de borde de grano, pero también por el espaciado de las maclas mecánicas. Además los bordes polygonizados sugieren un proceso de recrystalización estático más tardío. La fábrica que define la foliación oblicua está sobreimpuesta a un bandeoado restítico, definido por la concentración de insolubles y otras fases minoritarias. El espaciado del bandeoado restítico es heterogénea (varía entre $>200\mu\text{m}$ y $<1000\mu\text{m}$) y algunos de sus límites están retrabajados por estructuras de disolución tardías, definidas por una mayor concentración de opacos. En detalle, los opacos se disponen sobre planos a lo largo de bandas paralelas a la foliación principal S_2 . En estas bandas restíticas se encontraron inclusiones fluidas de tamaños $<2-4\mu\text{m}$, no aptas para su análisis termobarométrico.

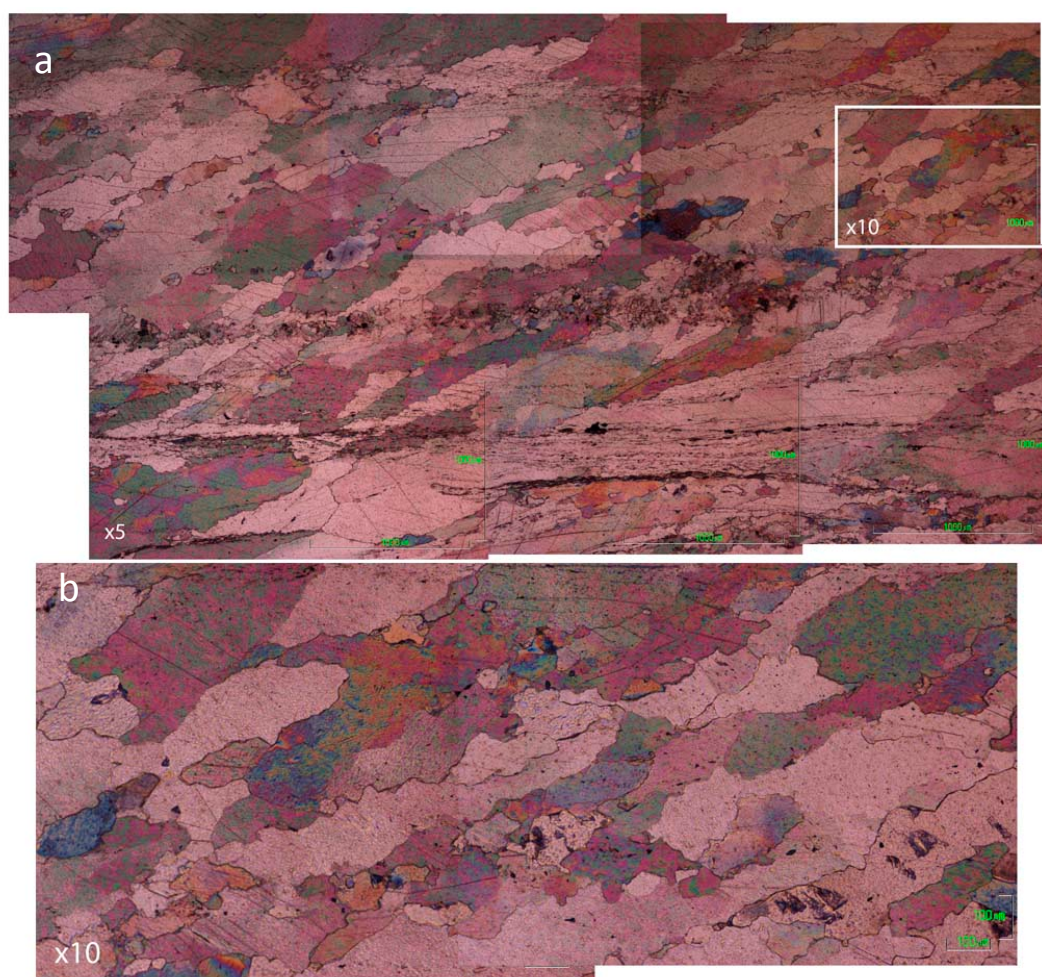


Figura 13: Mosaico de imágenes adquiridas con OM (nicoles cruzados) de la muestra JE9115, con oculares x5 (a) y x10 (b). Se señala en el mosaico x5 la superficie que corresponde a la ampliación x10.

JE1062: Mármol esparítico con (>90% modal calcita). Al igual que se observaba en la muestra JE9115, presenta una foliación oblicua del tipo S-C, definida por los fenoblastos de calcita y sobreimpuesta a un bandeoado composicional donde se concentran las otras fases minerales y los opacos (Fig. 14). Todos los cristales aparecen intensamente maclados. En este caso se observan más cristales con maclas de tipo II y III (Burkhard, 1993), que en las muestras anteriormente descritas. La irregularidad de los bordes de calcita está definida fundamentalmente por el espaciado y la tipología de las maclas. El bandeoado restítico presenta un espesor de aproximadamente 100µm y un espaciado de 400µm. Procesos de disolución por presión tardíos producen una concentración de opacos y un aumento en la irregularidad de los bordes de los fenoblastos de estas zonas de disolución.

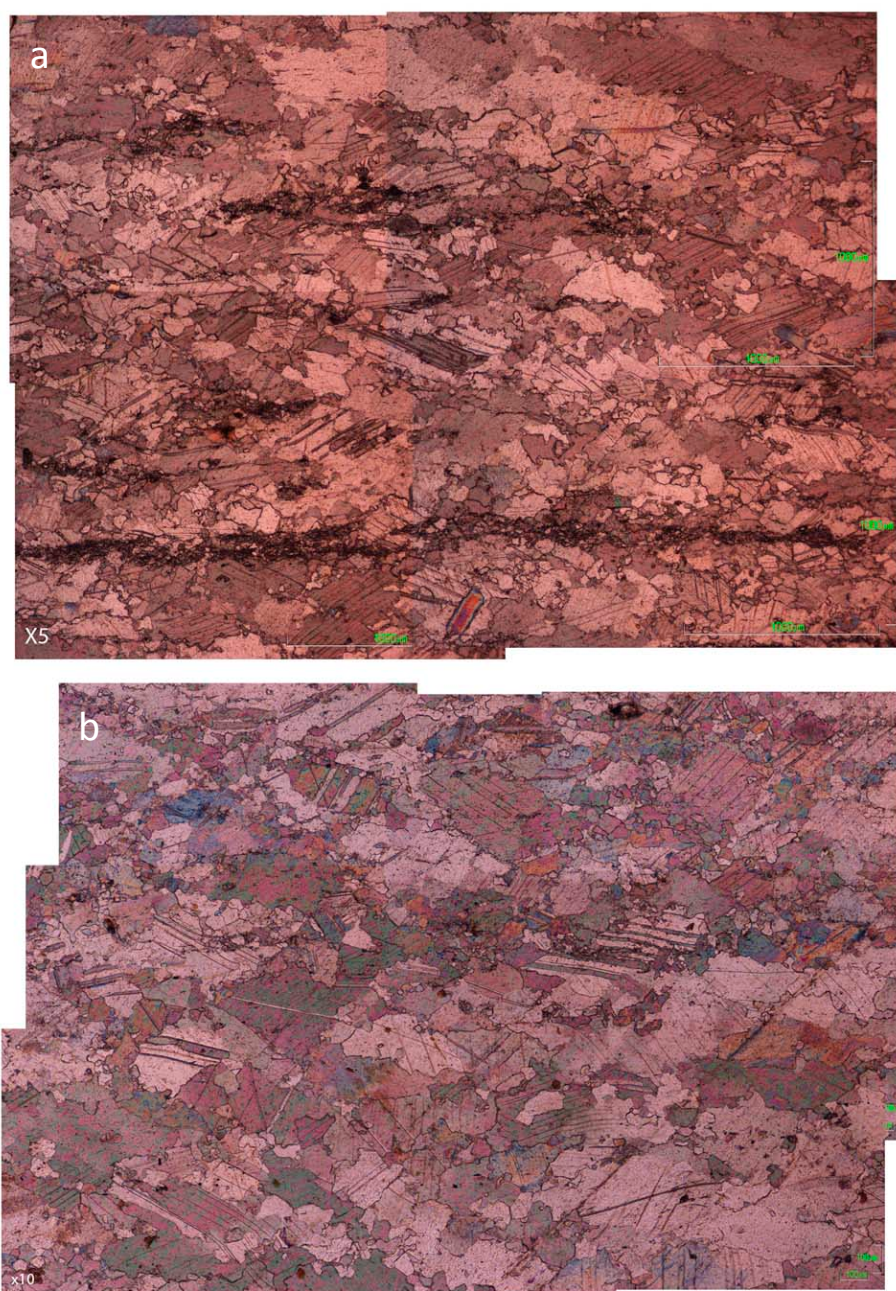


Figura 14: Mosaico de imágenes adquiridas con OM (nicoles cruzados) de la muestra JE1062 con oculares x5 (a) y x10 (b).

3.1.2 Punta Balandra

02JE120: Mármol esparítico constituido por calcita (80% modal), cuarzos (5% modal), cristales de lawsonita, fengita y glaucofana (10% modal) y una mínima fracción de esfena y minerales opacos (Fig.15). La calcita presenta una textura fenoblástica con cristales elongados de orientación oblicua a la foliación principal S_2 . Se observa como en muchos casos la orientación oblicua está definida por la flexión que el clivaje C' produce sobre el maclado mecánico, dando una foliación oblicua del tipo S_2-C' . La foliación principal S_2 está definida por la orientación de los filosilicatos. El cuarzo se presenta en forma de cristales equigranulares redondeados. Los opacos son escasos y se concentran en torno a restos pseudomorfos de cristales maclados (posiblemente albitas). Las maclas tienen una incidencia cercana al 100% en la fábrica esparítica. Son abundantes las maclas de los tipos I, II y más escasas las de tipo III (Burkhard, 1993). En ocasiones aparecen sobre un mismo cristal los tres tipos de macla.

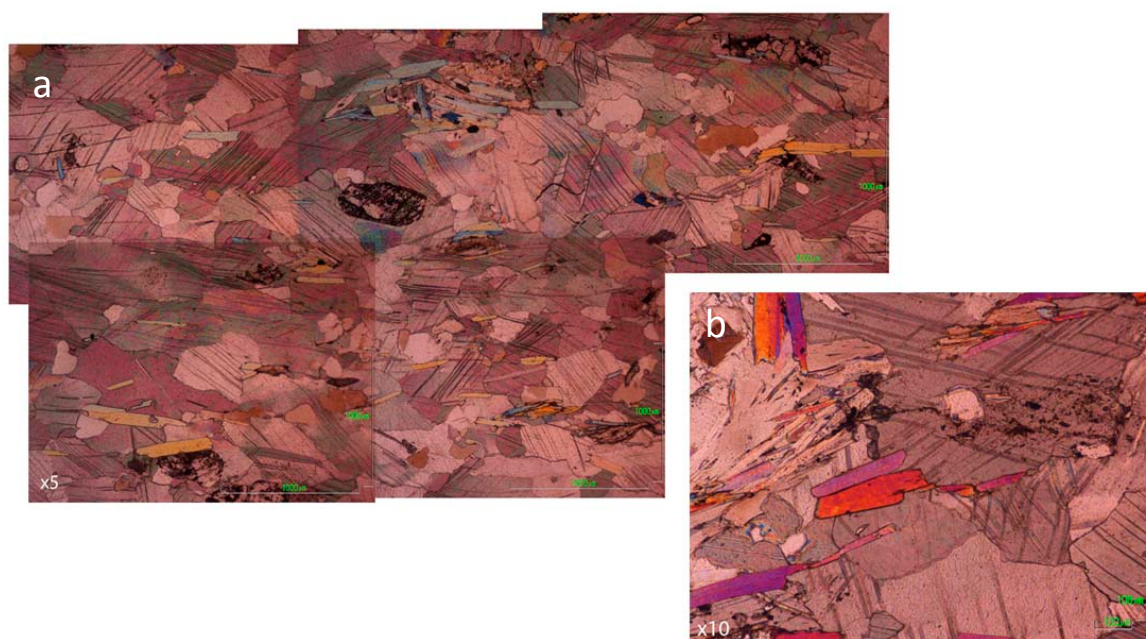


Figura 15: Mosaico de imágenes adquiridas con OM (nicoles cruzados) de la muestra 02JE120, con oculares x5 (a) y x10 (b).

JE119: Este calcoesquisto está compuesto mayoritariamente por calcita (<70% modal), cuarzo (10% modal), porfidoblastos de granate, lawsonita y abundante material opaco. Los opacos se concentran sobre restos de cristales fantasma pseudomórficos y también en torno a superficies de disolución tardías (Fig. 16). Los cristales de calcita de la fracción de mayor tamaño están ligeramente elongados y definen una orientación paralela a la foliación S_2 . Las maclas de tipo II y III son abundantes (70% de incidencia) y la irregularidad de bordes de grano está condicionada por la densidad de maclado y su orientación. La lawsonita también se orienta paralela a la foliación S_2 y en las colas de sombra de presión que bordean a los granates.

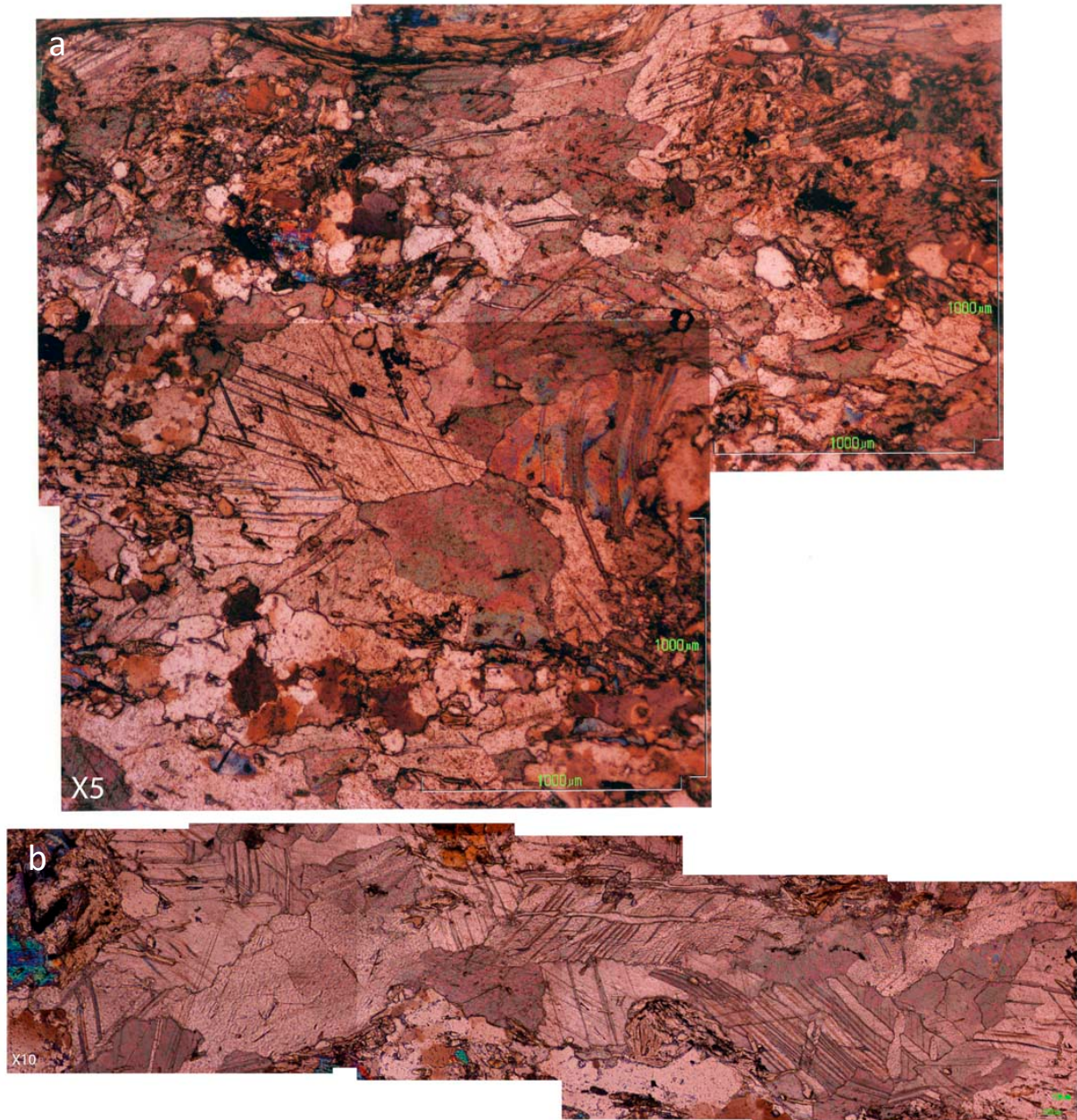


Figura 16: Mosaico de imágenes adquiridas con OM (nicos cruzados) de la muestra JE119, con oculares x5 (a) y x 10 (b).

JE9072: Es un micaesquistos con granate y epidota, presenta la calcita como fase minoritaria (<5% modal). La fábrica de calcita (Fig. 17) consiste en agregados de fenoblastos con maclas de tipo II y III y en menor proporción de tipo I (Burkhard, 1993). Se observan opacos dispuestos en bandas de alteración sobre las que hay también una mayor concentración de filosilicatos.

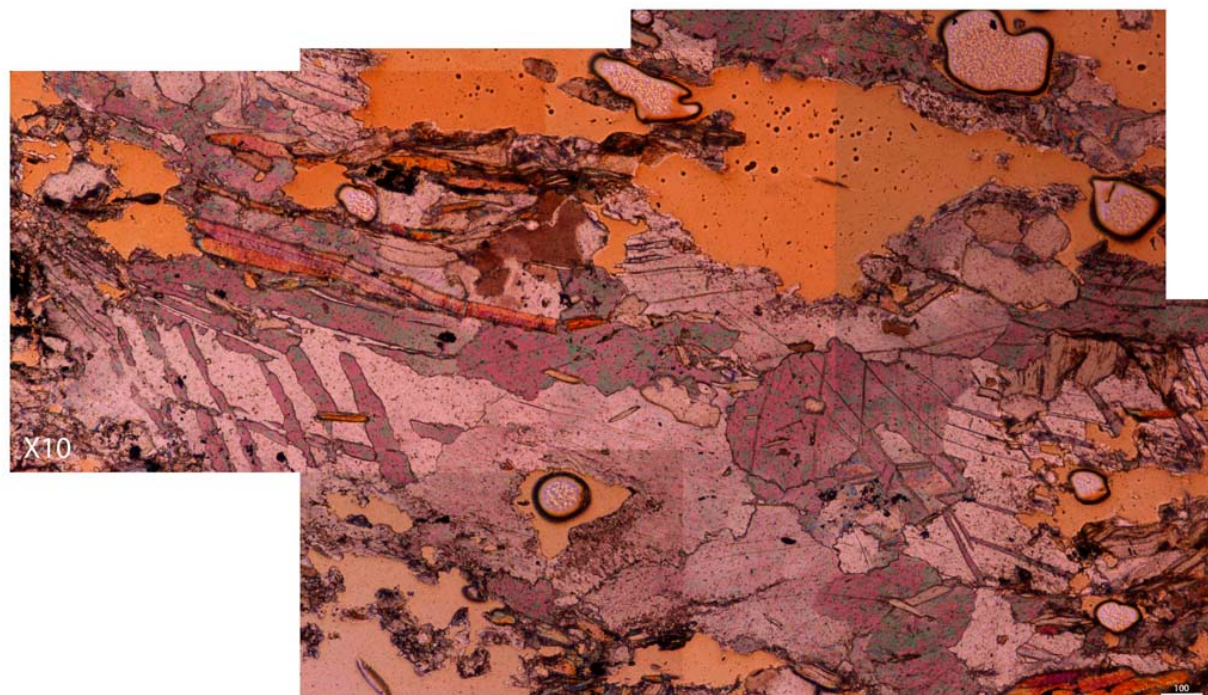


Figura 17: Mosaico de imágenes adquiridas con OM (nicos cruzados) de la muestra JE9072, con ocular x10.

JE9096: Es un mármol esparítico con una composición modal >90% calcita. Los cristales de mayor tamaño aparecen ligeramente elongados en dirección subparalela a la foliación S_2 , mientras que en las fracciones de menor tamaño los cristales son poligonales y de tendencia equigranular, con abundantes puntos triples en sus bordes de grano. De forma aislada se observan cuarzos equigranulares redondeados (<5% modal) y también aparece material opaco disperso (<10% modal) o concentrado en torno a lo que parecen “fantasmas” pseudomórficos (Fig. 18). La incidencia maclas en la calcita es próxima al 100%. Los tipos I y II (Burkhard, 1993) son muy frecuentes. Las maclas están flexionadas y su deformación desarrolla una foliación oblicua de tipo S_2-C' . La irregularidad de los bordes de los fenoblastos de calcita está poligonizada, sugiriendo una migración de los bordes termal en condiciones estáticas.

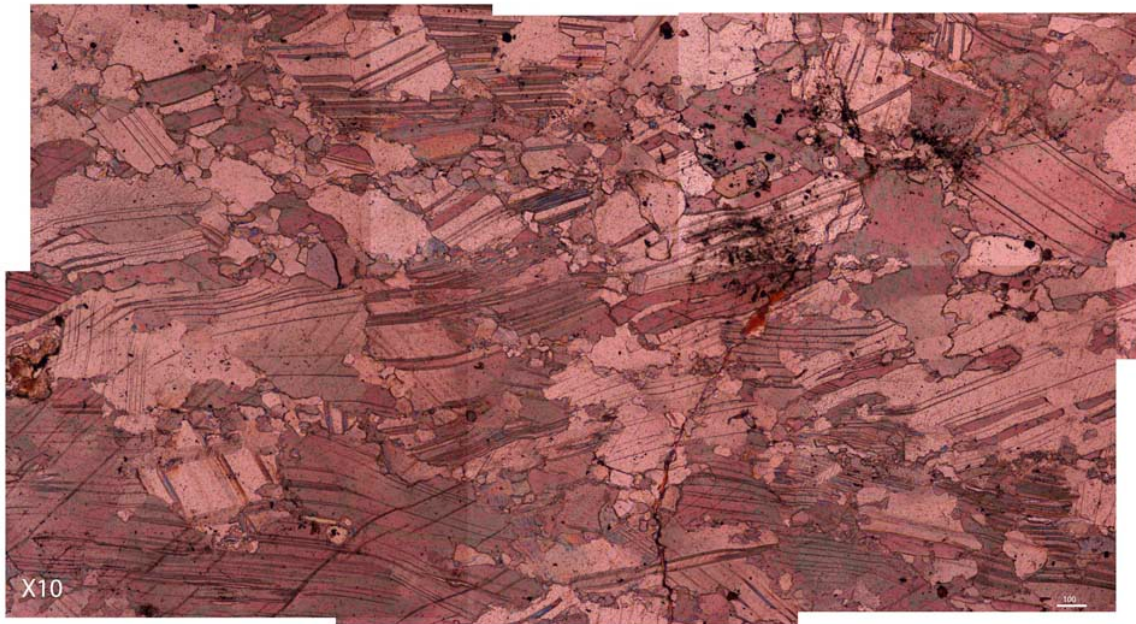


Figura 18: Mosaico de imágenes adquiridas con OM (nicos cruzados) de la muestra JE9096, con ocular x10.

3.2 Análisis de distribución de tamaños de grano (GSD) de las imágenes OM

Se ha hecho un análisis cuantitativo de la distribución y de la forma de los cristales (GSD) que constituyen las fábricas de los mármoles y calcoesquistos siguiendo la metodología descrita en el apartado 2.2. En este apartado se describen los diagramas obtenidos a partir del tratamiento de imágenes OM.

3.2.1 Diagramas GSD-OM

La GSD se analiza en un diagrama que representa dos variables en abscisas, la frecuencia y el área (respectivamente la línea continua y discontinua de la Fig. 19) frente al tamaño de grano, medido como el diámetro (d) de un círculo equivalente al área A_i del polígono que forma cada grano delineado. Tanto las muestras analizadas de la unidad de Punta Balandra, como las de los Esquistos de Santa Bárbara presentan varias poblaciones de GSD cuyas fracciones coinciden. Así se pueden identificar generalmente una fracción media ($f.m.$), dos fracciones finas ($f.f.1$ y $f.f.2$, de menor y mayor tamaño medio de grano respectivamente) y dos fracciones gruesas ($f.g.1$ y $f.g.2$ de menor y mayor tamaño medio de grano respectivamente). Las dos fracciones finas tienen los mismos valores de tamaños medios de diámetro ($f.f.1 \approx 5\mu m$ y $f.f.2 \approx 15\mu m$) en las muestras de la unidad de Punta Balandra y en la de los Esquistos de Santa Bárbara y son comparables también a las encontradas en los Mármoles del Rincón (Tabla I). Así la $f.f.2$ también se ha interpretado como la población de granos recrystalizados por migración de bordes de grano.

Los diagramas presentan diferencias a nivel del porcentaje relativo que representan cada una de las fracciones identificadas. En la unidad de Punta Balandra se ha medido una población total >3000 granos y en los Esquistos de Santa Bárbara una población total >7000 granos. Las $f.m.$ de ambas poblaciones representan porcentajes de frecuencias similares e inferiores al 6%, oscilando las fracciones finas entre el 22% de la $f.f.1$ y el 12% de la $f.f.2$ de los Esquistos de Santa Bárbara y un valor más regular para ambas fracciones ($\approx 15\%$) en el caso de las muestras de la unidad de Punta Balandra. Las fracciones gruesas de GSD-OM se interpretan como cristales cuya orientación es favorable para su crecimiento durante la deformación plástica y son poco significativas a nivel de porcentaje relativo de frecuencia.

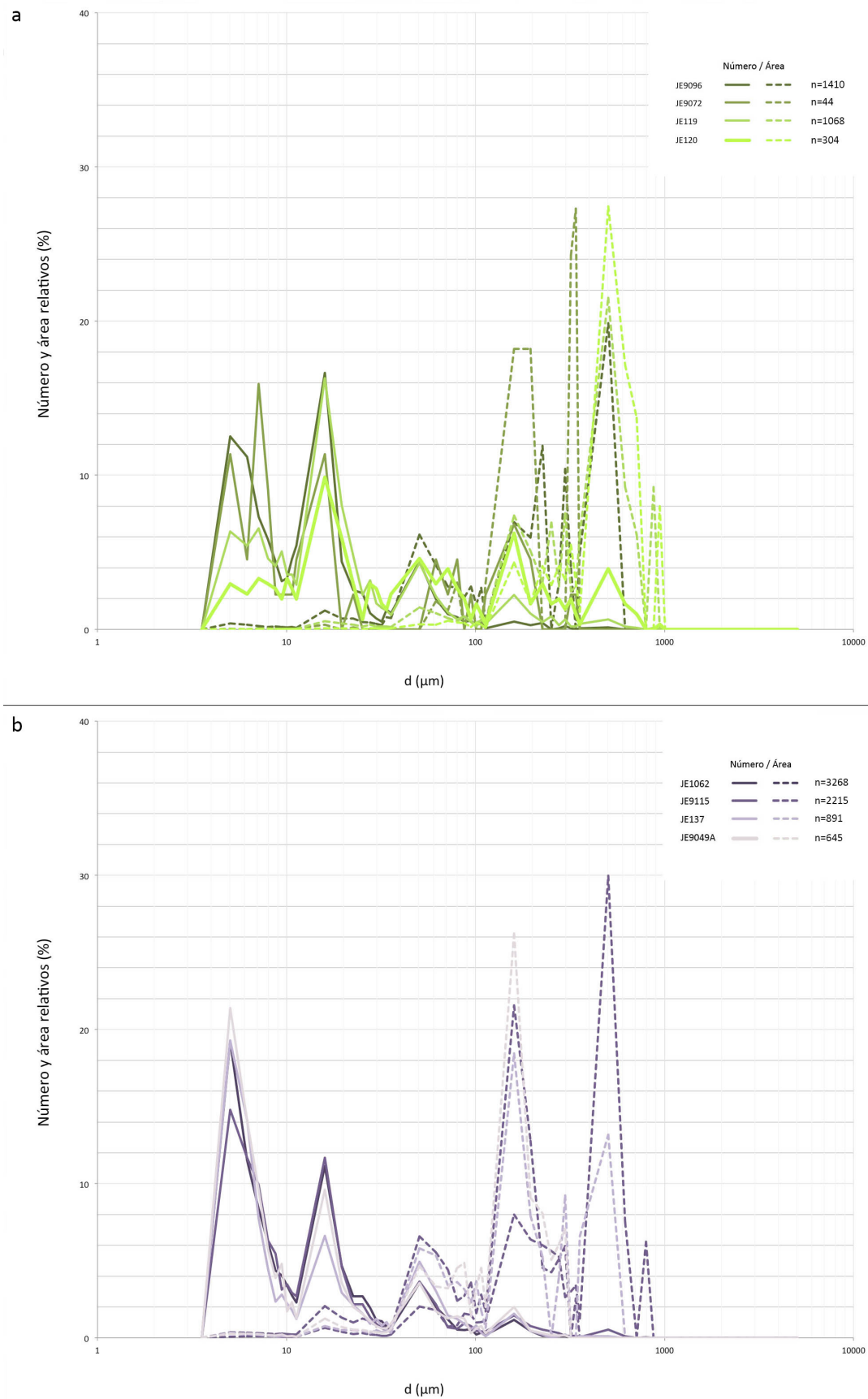


Figura 19: Diagramas de las GSD correspondientes al análisis de imágenes de OM de cada una de las muestras pertenecientes a las unidades de Punta Balandra (a) y a la unidad de Esquistos de Santa Bárbara (b).

3.2.2 Diagramas de Orientación-OM

La orientación de los cristales de calcita se estudia relacionando el ángulo formado entre el eje mayor de la elipse inscrita en cada cristal de calcita con la foliación S_2 analizada en las láminas delgadas orientadas (secciones XZ). Se ha calculado el porcentaje de cristales que se orientan en un intervalo de 10° grados de 0 a 180° , siendo 0° el sentido positivo del eje X y 180° el negativo medido en sentido anti-horario.

En general, las orientaciones son simétricas respecto al plano de foliación S_2 (Fig. 20). Aunque las muestras JE9072, en la que se han podido medir pocos granos, y la muestra JE137 que tiene una débil fábrica por efecto de una recuperación estática, no tienen una orientación preferente. Sólo las muestras JE9115 y JE9045A de los Esquistos de Santa Bárbara (Fig. 20b) tienen una desviación asimétrica, mostrando un máximo de orientación en el intervalo de 20° debido al desarrollo de las foliaciones oblicuas del tipo S-C.

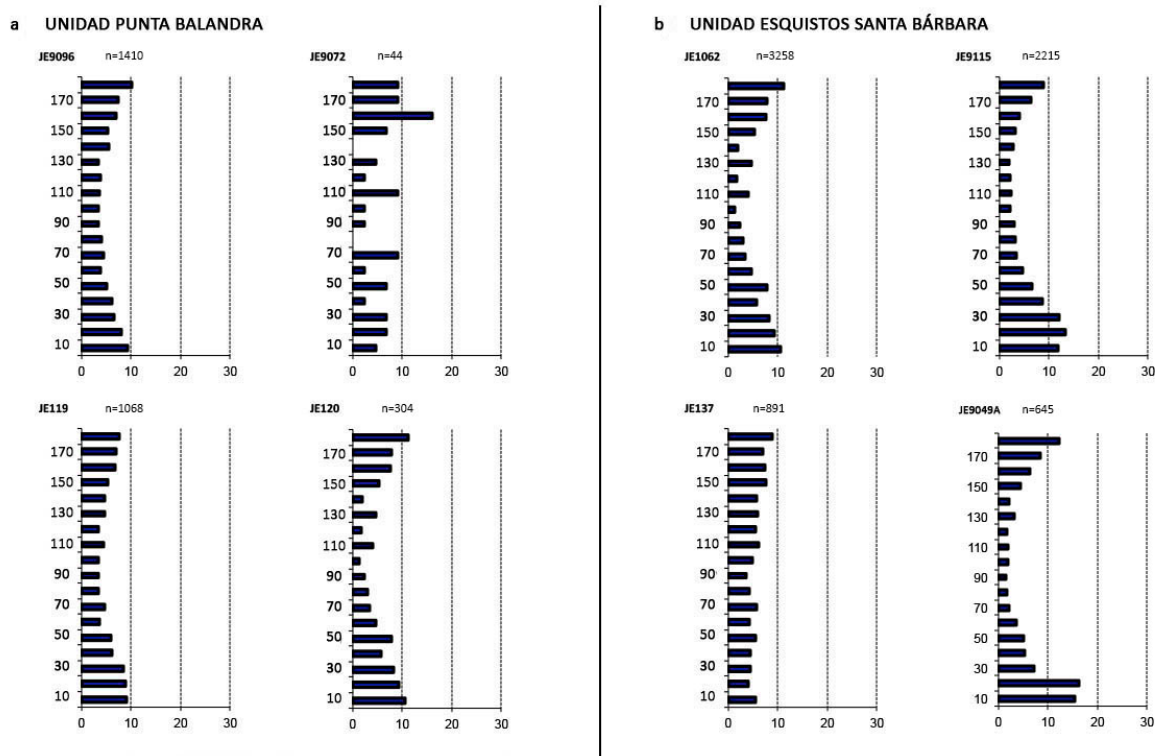
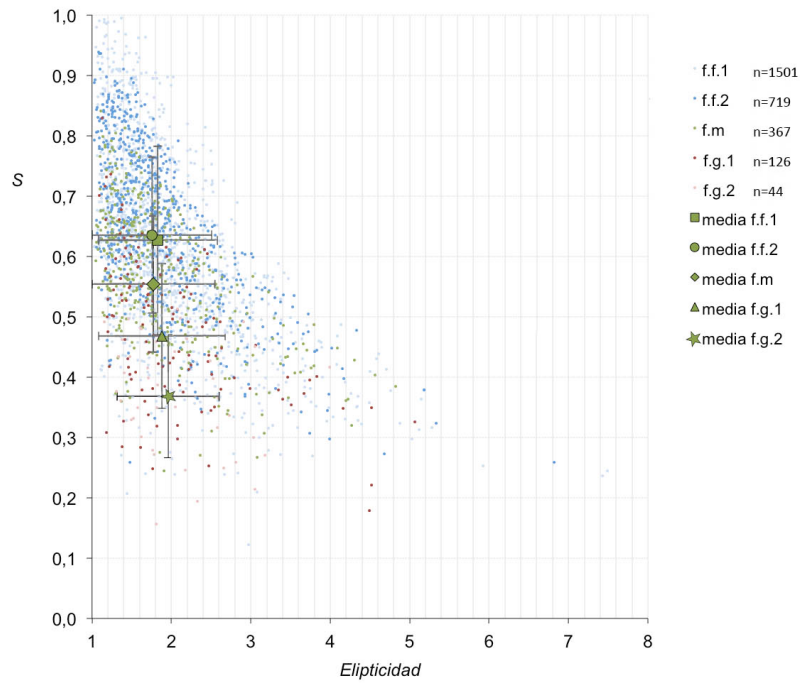


Figura 20: Orientaciones de los cristales de calcita identificados en cada muestra en imágenes de OM con respecto a la foliación S_2 (dirección X). En el eje de abscisas se representa el porcentaje relativo de cristales.

3.2.3 Diagramas de Forma-OM

Se observa una correlación clara entre las fracciones diferenciadas por tamaños y el parámetro de forma en las muestras de las dos unidades (Fig. 21). Como cabría esperar, S decrece conforme aumenta el tamaño de grano. Sin embargo, la elipticidad de los cristales se mantiene constante en las muestras de la unidad de Punta Balandra (≈ 2), mientras que en las fracciones gruesas de los Esquistos de Santa Bárbara aumenta con el aumento de tamaño. En la descripción petrográfica de las imágenes OM se observaron cristales elongados de calcita definiendo foliaciones oblicuas tardías, por lo que se interpreta el aumento de elipticidad de los Esquistos de Santa Bárbara como un aumento de la cizalla hacia la base del prisma de acreción producido en los estadios tardíos de su emplazamiento. La *ff.2* de ambas unidades tiene un parámetro de forma similar $S \approx 0,64$, lo que es consistente con interpretar esta fracción como la que representa a la población de cristales recrystalizados dinámicamente, mientras que la *ff.1* tiene más variabilidad.

a



b

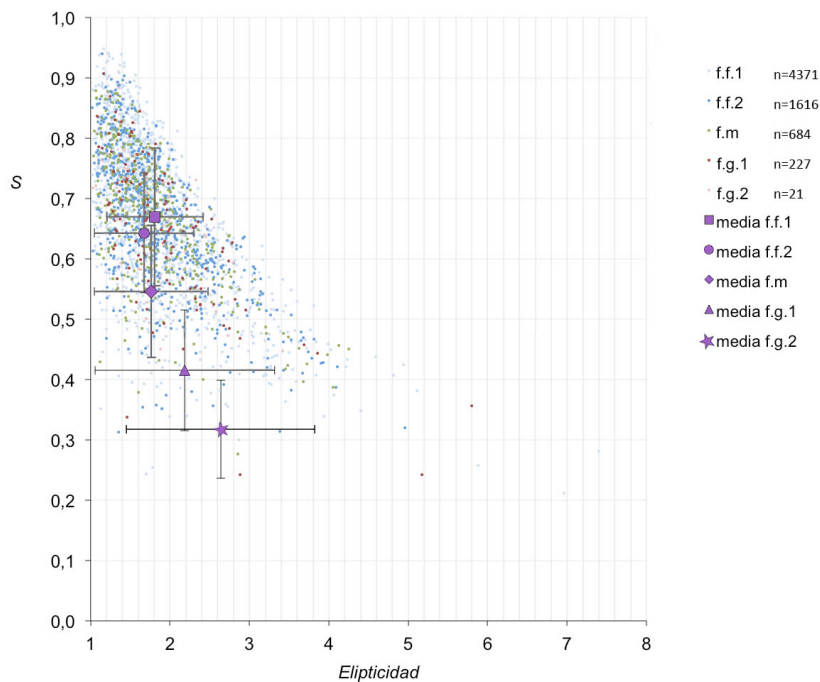


Figura 21: Diagramas que representan la relación entre el parámetro de forma (S) y la elipticidad para cada uno de los cristales de las unidades de Punta Balandra (a) y Equistos de Santa Bárbara (b) analizados sobre imágenes de OM. Se separan las distintas fracciones de tamaño indicando el número de cristales que las componen (n) y se representa para cada una la media geométrica y su desviación estándar.

3.2.4 Diagramas $\log(\text{frecuencia})/\log r_i$ -OM

Estos diagramas tienen por objeto analizar la fractalidad de la GSD. Así cuando la variación de un parámetro con respecto a otro se ajusta a una ecuación potencial, en el que el exponente de la ecuación es una constante (si no sería una ecuación exponencial), esta relación es fractal y el exponente de la ecuación define su dimensión fractal (D) (Epstein, B. 1947). Turcotte, D.L. (1986) demostró que la fragmentación era un proceso fractal, y por lo tanto escalo-independiente, en el que se puede relacionar la cantidad de fragmentos con su tamaño. D mide la fragilidad del material fragmentado y debe aproximarse a 3 para que el volumen del material fragmentado sea próximo al volumen del material del que proceden los fragmentos. Blenkinsop (1991) analizó la fractalidad de las cataclasitas procedentes de distintos tipos de rocas de falla y concluyó que la fragilidad no sólo era función del tipo de material, sino también de los mecanismos de deformación que se activaban durante el refinamiento del tamaño de grano. Así se obtienen menores valores de D para procesos como la alteración, que para otros procesos como la fragmentación. Los valores más frecuentes de D en cataclasitas procedentes de rocas carbonatadas varía entre 2 y 3,5 (Billi, 2007).

El parámetro D se obtiene fácilmente, como la pendiente del ajuste lineal del diagrama $\log(\text{frecuencia})/\log r_i$. Para obtener los diagramas de GSD bi-logarítmicos, se calculan los logaritmos en base 10 de todos los r_i y se agrupan en intervalos de $\log r_i$ de 0,1 desde 0,3 hasta 3 (lo que equivale a r_i desde 1,9953 μm hasta 1000 μm respectivamente).

Puesto que los diagramas GSD muestran un patrón de distribución similar para las distintas fracciones de tamaños de cada unidad, en la Fig. 22 se han proyectado los datos agrupados por unidades. Ambas unidades presentan ajustes lineales muy buenos (R^2 varía entre 0,94 y 0,98) con una rotura de pendiente (r_k) común del $\log r_i \approx 2,35$ ($r_i = 258 \mu\text{m}$ y $214 \mu\text{m}$). La fracción de mayor tamaño de la unidad de Punta Balandra tiene una $D=2,75$, mientras que los Esquistos de Santa Bárbara tienen una $D=3,89$. Las fracciones de menor tamaño tienen unos valores mucho más bajos y poco frecuentes en cataclasitas carbonatadas (Billi, 2007).

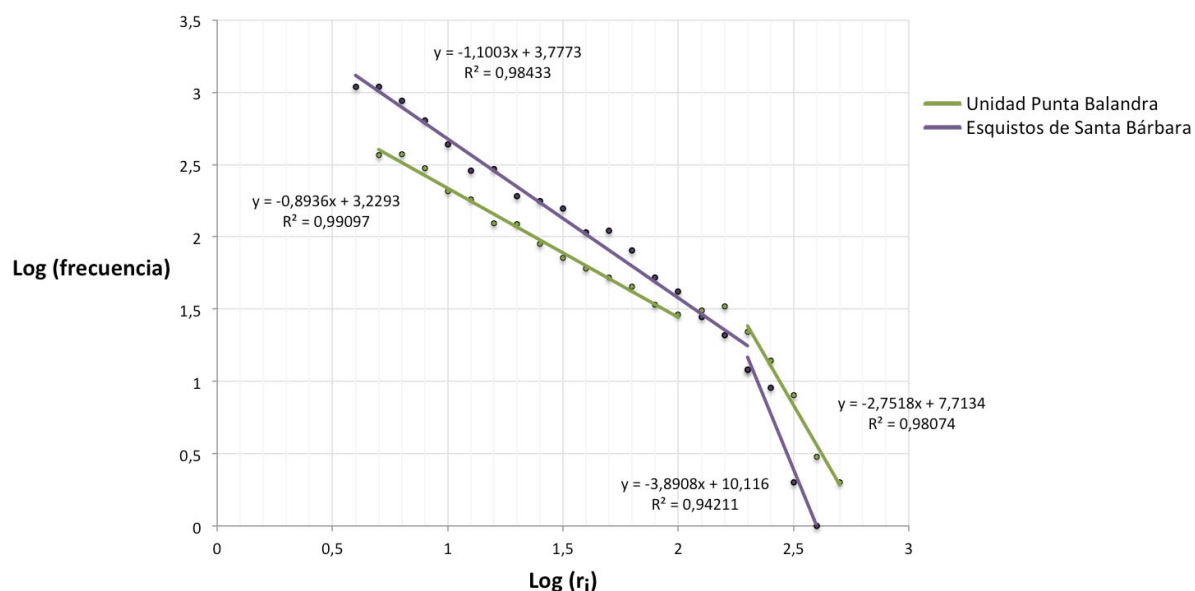


Figura 22: Proyección del $\log r_i / \log (\text{frecuencia})$ para los datos agrupados en intervalos de las unidades Punta Balandra y Esquistos de Santa Bárbara correspondientes al análisis de imágenes OM.

3.3 Descripción petrográfica de las imágenes de Optical-CL

La luminiscencia en los carbonatos va asociada fundamentalmente al contenido en Mn que produce tonos anaranjados en las imágenes obtenidas con el equipo de CL. En cambio la opacidad va asociada al contenido en Fe de los carbonatos (Long y Agrell, 1965; Sommer, 1972). Otras luminiscencias que podemos encontrar son de tonalidad verdosa (circones, burbujas en la lámina) y en ocasiones pueden ir asociadas a la presencia de aragonito (Marshall, 1988). La materia orgánica a veces también produce luminiscencias de intensidad variable. Variaciones de la luminiscencia siempre indican variaciones en la composición del carbonato, que generalmente están relacionadas con cambios en las condiciones de oxidación (no luminiscencia) reducción (luminiscencia alta). Estos cambios pueden ser muy significativos también en las estructuras cataclásticas, puesto que la composición de los fragmentos cataclásticos grandes puede ser distinta de la matriz cataclástica fina que los rodea.

3.3.1 Esquistos de Santa Bárbara

JE9049A: La imagen de Optical-CL (Fig. 23) muestra bandeados de luminiscencia alta paralelos a la S_2 . Por lo tanto el bandeo luminoso separa dominios composicionales dentro del mármol. Los dominios luminiscentes coinciden con los dominios donde hay concentración de opacos. En estos dominios se aprecian cambios de luminiscencia que permiten discriminar cristales de calcita poco luminiscentes y de bordes irregulares

poligonizados de un cemento carbonatado luminiscente. Si comparamos la imagen de la Fig. 23 con la de la misma muestra tomada con OM (Fig. 11) se puede apreciar que con frecuencia lo que en las imágenes OM se identifica como un simple fenoblasto de calcita, corresponde en realidad a varios cristales de calcita poco luminiscente cementados entre sí, por una matriz carbonatada luminiscente.

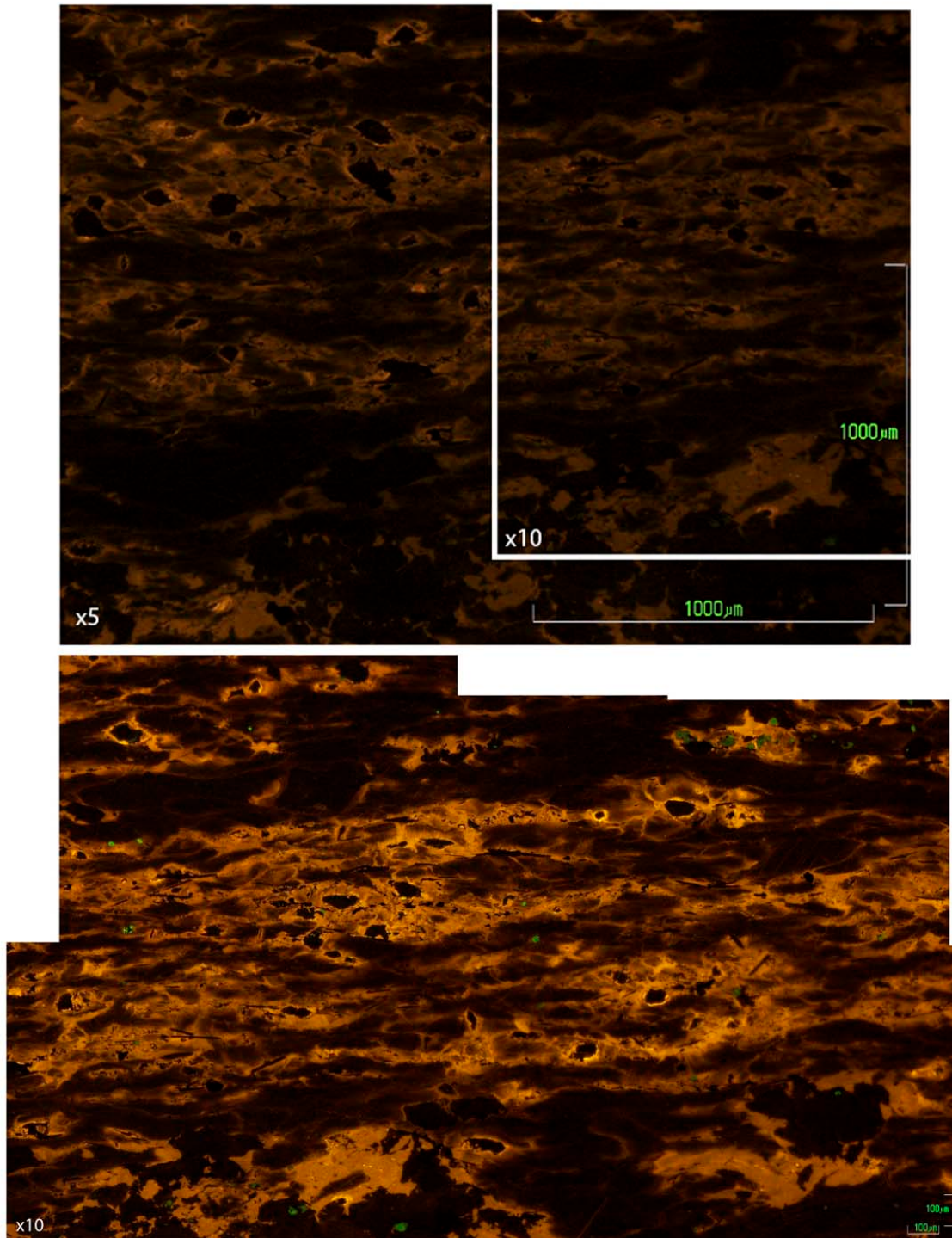


Figura 23: Mosaico de imágenes adquiridas con Optica-CL de la muestra JE9049A, con oculares x5 (superior) y x10 (inferior). La superficie que corresponde a la ampliación x10 se señala en el mosaico x5. Nótese que estas imágenes cubren el mismo área de la muestra que las adquiridas por OM de la Fig. 11.

JE1062: La imagen de Optical-CL de menor aumentos (Fig. 24a) muestra una fábrica foliada en el que se observan bandas de alta luminiscencia que corresponde con bandas de disolución tardía en donde se concentran gran cantidad de material insoluble. Entre estas superficies de disolución se aprecia una fábrica foliada poco luminiscente. En detalle (Fig. 24b), se puede ver como estos dominios de baja luminiscencia están formados por cristales de calcita poco luminiscentes de bordes angulosos rodeados por una matriz carbonada más luminiscente y material opaco muy luminiscente que en conjunto definen una fábrica foliada y paralela a la S_2 .

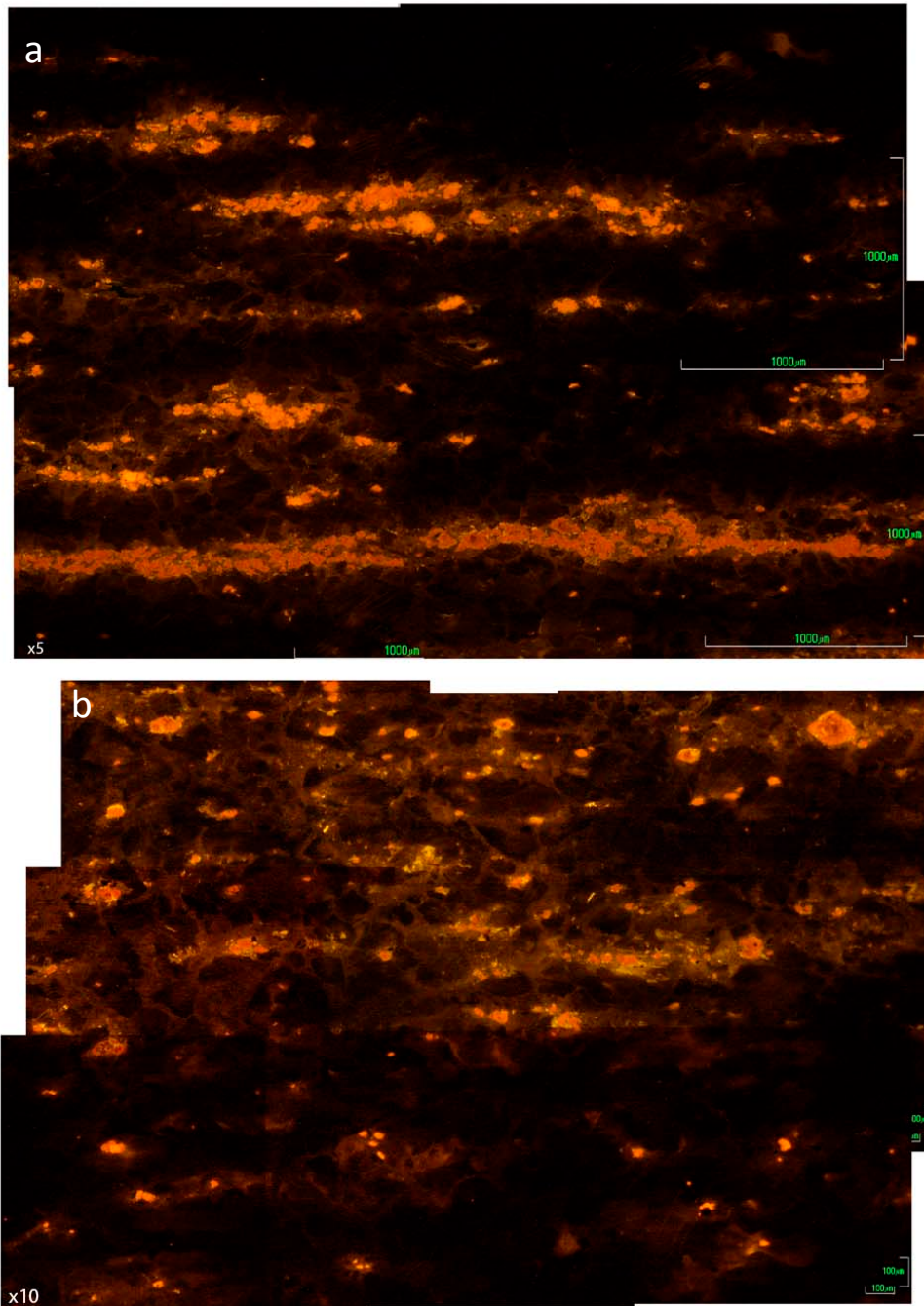


Figura 24: Mosaico de imágenes adquiridas con Optica-CL de la muestra JE1062, con oculares x5 (a) y x10 (b). Se señala en el mosaico x5 la superficie que corresponde a la ampliación x10. Nótese que estas imágenes cubren el mismo área de la muestra que las adquiridas por OM de la Fig. 14.

3.3.2 Punta Balandra

02JE120: La imagen de Optical-CL de menor aumentos (Fig. 25a) muestra una fábrica formada por agregados de calcita de luminiscencia baja y otras fases minerales de alta o nula luminiscencia. Los bordes de grano y de algunos planos de macla están resaltados por límites luminiscentes. Ni a esta escala, ni en detalle (Fig. 25b), se aprecian fábricas cataclásticas relictas. Las dos manchas verdosas de la Fig. 25b son burbujas de aire.

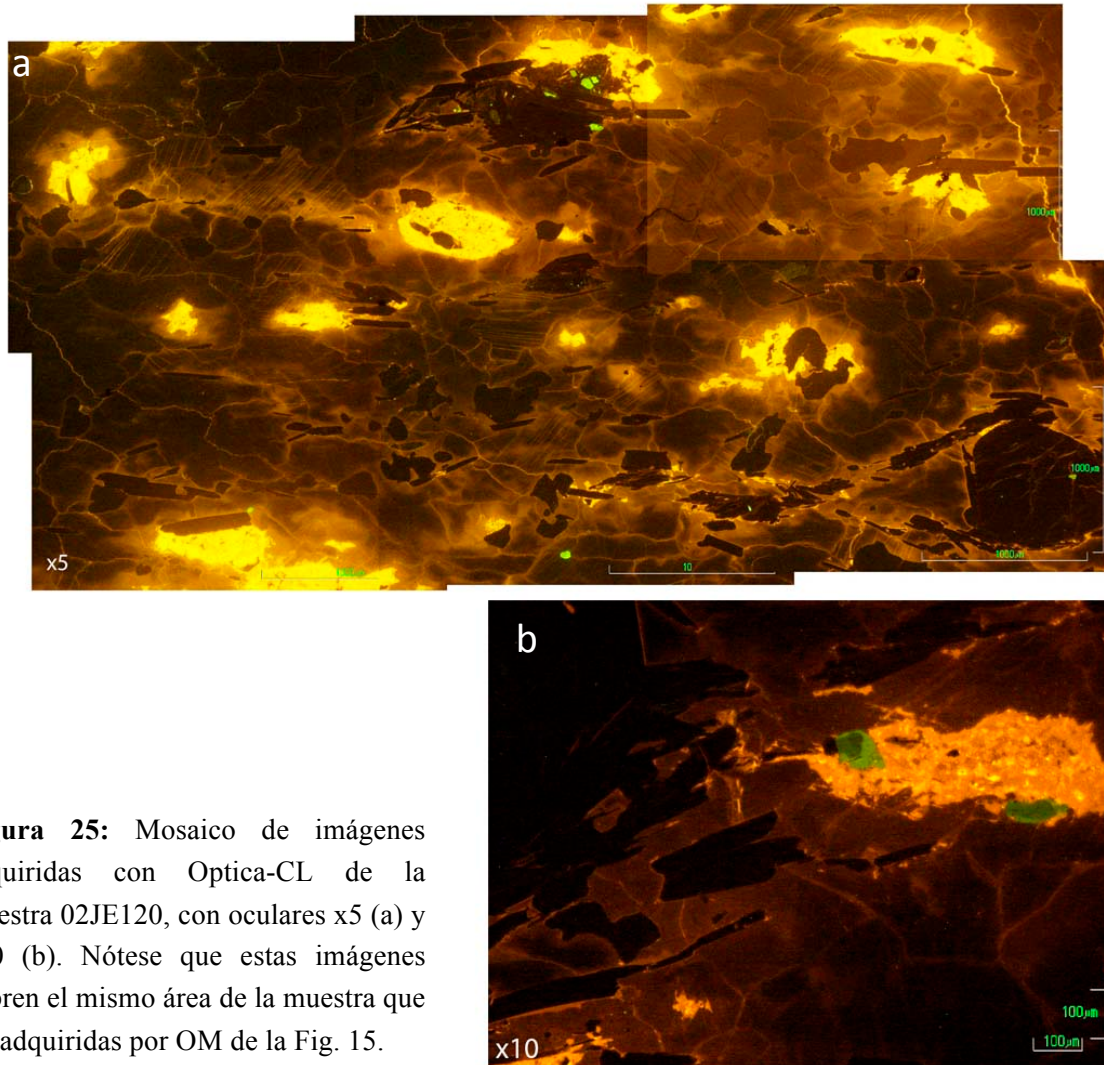


Figura 25: Mosaico de imágenes adquiridas con Optica-CL de la muestra 02JE120, con oculares x5 (a) y x10 (b). Nótese que estas imágenes cubren el mismo área de la muestra que las adquiridas por OM de la Fig. 15.

JE119: La imagen de Optical-CL de menor aumentos (Fig. 26a) muestra una fábrica formada por agregados de calcita de luminiscencia baja y otras fases minerales de alta o nula luminiscencia. Los bordes de grano y de algunos planos de macla están resaltados por límites luminiscentes. Sin embargo a diferencia de la anterior fábrica, si se observan fragmentación y desplazamiento de los bordes de los calcita. En detalle (Fig. 26b), se aprecia como el proceso cataclástico es incipiente y se concentra en las zonas donde hay mayor reducción de tamaño de grano.

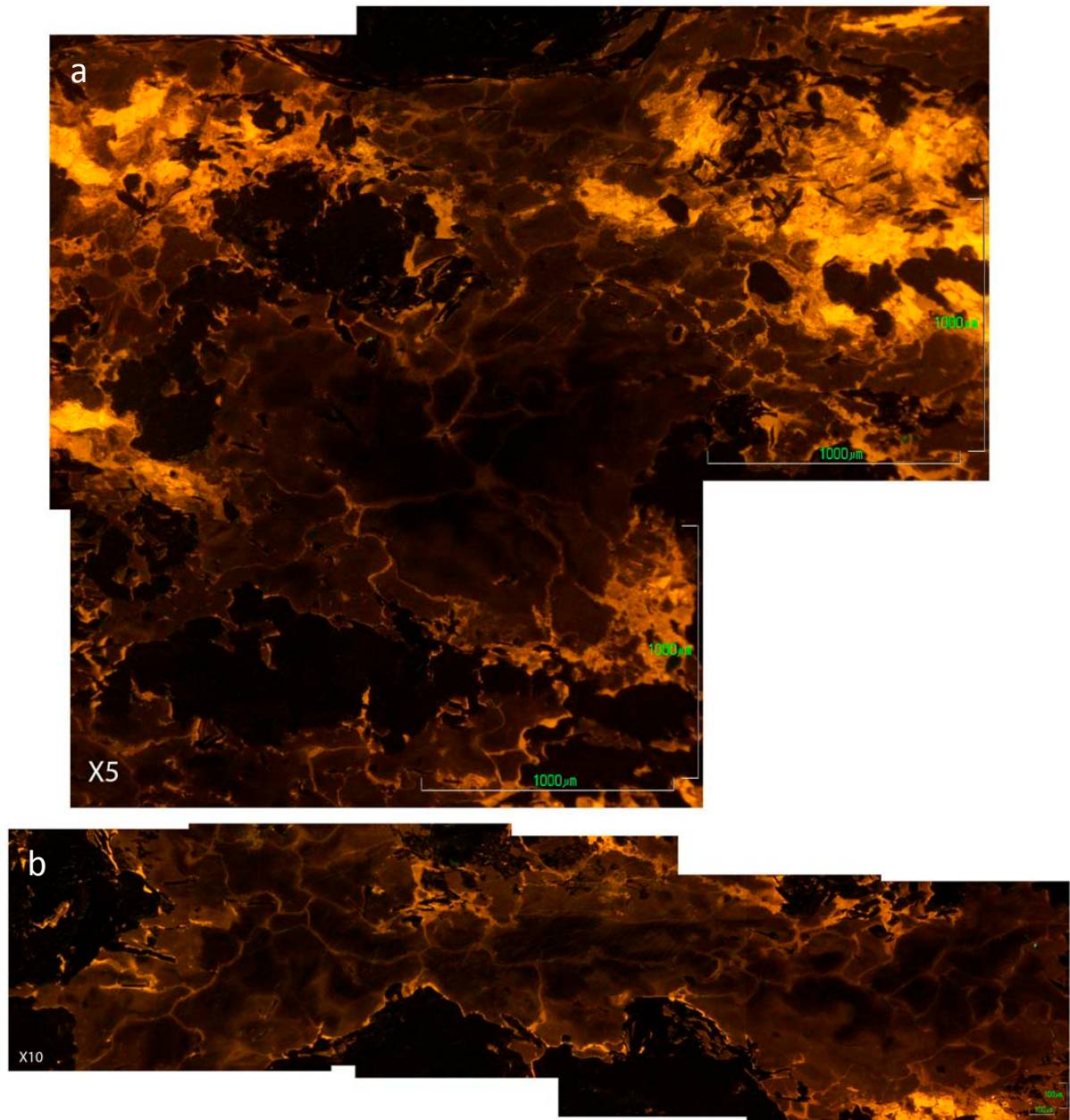


Figura 26: Mosaico de imágenes adquiridas con Optica-CL de la muestra JE119, con oculares x5 (a) y x10 (b). Nótese que estas imágenes cubren el mismo área de la muestra que las adquiridas por OM de la Fig. 16.

JE9072: La imagen de Optical-CL (Fig. 27) corresponde al mismo área de la mostrada en la imagen OM (Fig. 17). Existe una buena correspondencia entre las zonas de concentración de opacos con zonas de luminiscencia alta. El agregado policristalino, formado por grandes cristales de calcita maclados con maclas de tipo II y III de Burkhard (1993) de la Fig. 17, se transforma en un agregado policristalino formado por más cristales de menor tamaño y bordes rectos e interpenetrados luminiscentes, en donde las maclas mayormente no se observan. Además en las zonas con cristales de menor tamaño se llegan a observar texturas cataclásticas incipientes.

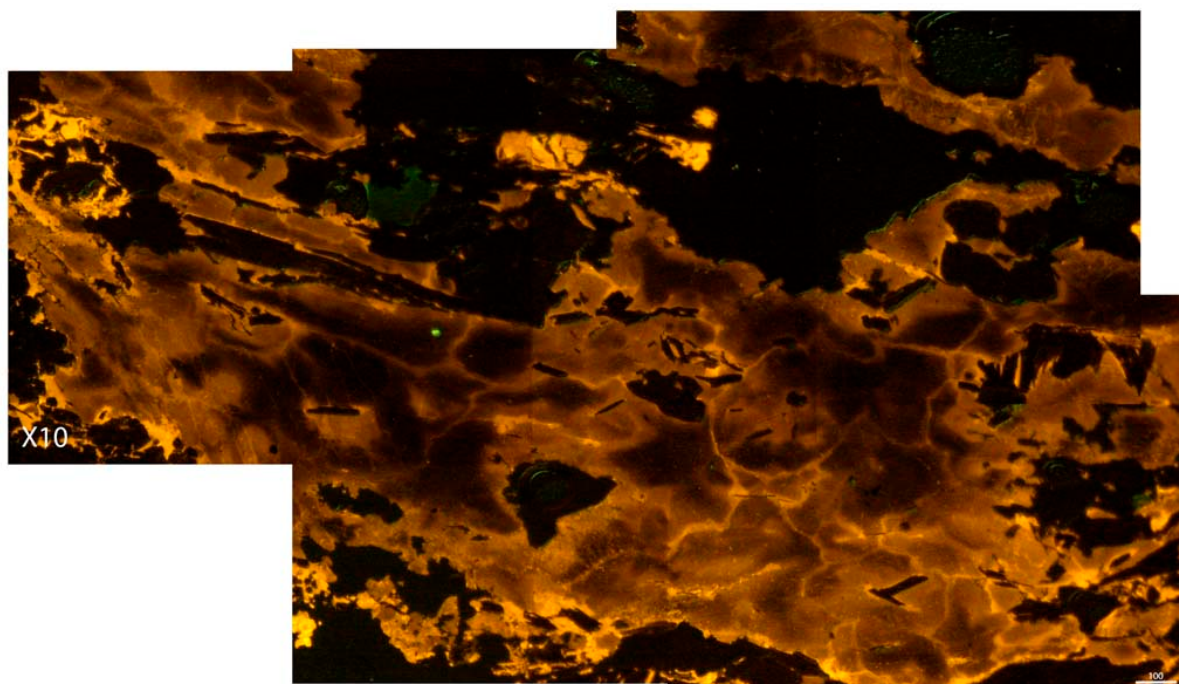


Figura 27: Mosaico de imágenes adquiridas con Optica-CL de la muestra JE9072, con ocular x10. Nótese que estas imágenes cubren el mismo área de la muestra que las adquiridas por OM de la Fig. 17.

JE9096: La imagen de Optical-CL (Fig. 28) muestra una fábrica esparítica ligeramente orientada. Se distinguen cristales de calcita de luminiscencia media rodeados por un cemento de mayor luminiscencia. También se observa mayor luminiscencia a lo largo de algunas zonas macladas con maclas de tipo II (Burkhard, 1993), especialmente sobre los bordes de los planos de maclas oblicuos a la lámina delgada. Si la comparamos con el mismo área de la imagen OM (Fig. 18) se puede observar una zona de textura cataclástica en el borde superior izquierdo indistinguible en la imagen OM. Se trata de fragmentos angulosos de calcita poco luminiscente rodeados por una matriz de luminiscencia intermedia. Además se distinguen en tonos verdosos tres cuarzos redondeados en la parte central derecha, próximos a una fractura tardía.

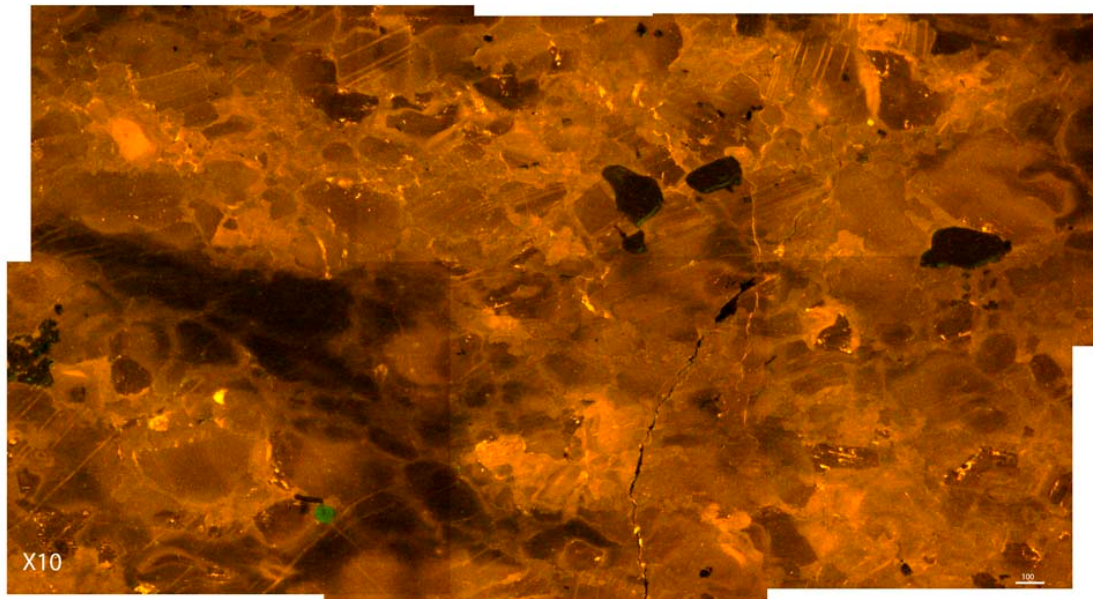


Figura 28: Mosaico de imágenes adquiridas con Optica-CL de la muestra JE9096, con ocular x10. Nótese que estas imágenes cubren el mismo área de la muestra que las adquiridas por OM de la Fig. 18.

3.4 Análisis de GSD de las imágenes de Optical-CL

El análisis de GSD-CL ha permitido caracterizar cuantitativamente las fábricas cataclásticas relictas, únicamente visible en las imágenes Optical-CL. La comparación de estos diagramas con los obtenidos de las imágenes OM permitirá discriminar las fracciones de tamaños originadas durante este proceso de las desarrolladas en relación con otros mecanismos de deformación.

3.4.1 Diagramas GSD-CL

La GSD obtenida a partir de imágenes Optical-CL (Fig.29) muestra cuatro fracciones con distribuciones normales. Dos distribuciones tienen menor tamaño que la distribución donde la fracción de área y la de número son similares (*f.m*-CL) y se han denominado *f.f.1*-CL (la de menor tamaño) y *f.f.2*-CL, respectivamente. Estos diagramas muestran varias diferencias con los diagramas GSD-OM (Fig. 19). Aunque los valores medios de las fracciones son equivalentes, desaparece la fracción *f.g.2* descrita para los diagramas GSD-OM y el porcentaje de la *f.m*-CL ($\approx 15\%$) aumenta considerablemente respecto a su equivalente. Así la tendencia general que muestran los diagramas GSD-CL es a aumentar el porcentaje de la fracción de número hasta la *f.m*-CL, mientras que en los diagramas GSD-OM tiende a disminuir. Esta diferencia en los diagramas GSD es consistente con la interpretación de que las *f.m*. y la *f.m*-CL representan las distribuciones normales de las fábricas relictas.

Se ha evaluado el cambio de área durante el proceso cataclástico midiendo la diferencia entre las áreas donde se han delineado clastos de calcita relictos de tamaño grande y luminiscencia baja con respecto al área de la matriz luminiscente que se define en la zona donde se han encontrado las fábricas relictas cataclásticas. Aunque se aprecian diferencias importantes entre las dos unidades, en general el cambio de área es mayor en las muestras de los Esquistos de Santa Bárbara que varía entre el 7% (JE9049A) y el 15% (JE1062), que en la unidad de Punta Balandra (5% en JE9096 y 6% en JE119).

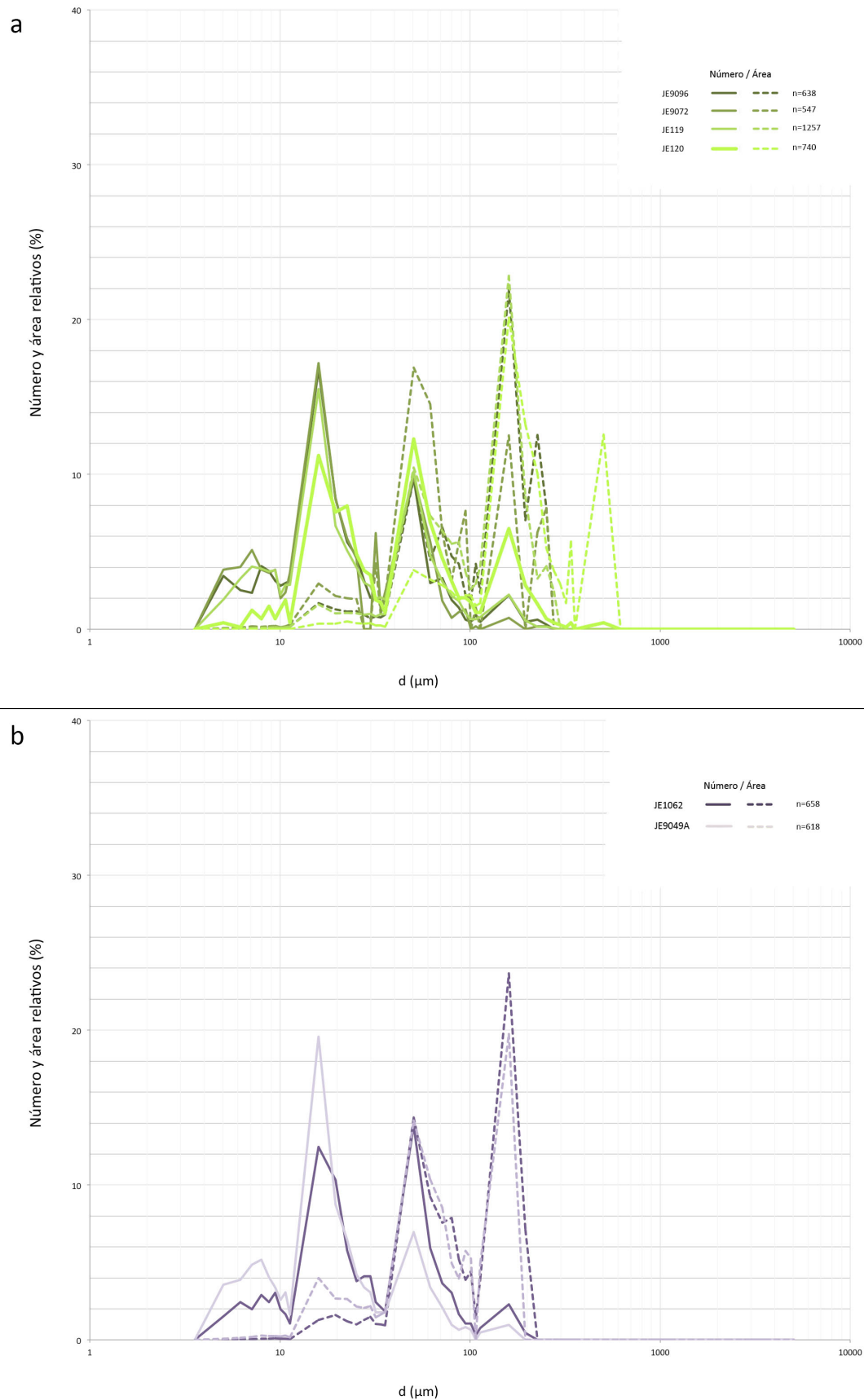


Figura 29: Diagramas de las GSD correspondientes al análisis de imágenes de Optical-CL de cada una de las muestras pertenecientes a las unidades de Punta Balandra (a) y a la unidad de Esquistos de Santa Bárbara (b).

3.4.2 Diagramas de Orientación-CL

La orientación del eje mayor de la elipse inscrita en los cristales de calcita de las fábricas analizadas en las imágenes-CL es simétrica con respecto a la S_2 (Fig. 30). No obstante dos muestras de la Unidad de Punta Balandra (Fig. 30a) muestran un sesgo asimétrico de bajo ángulo ($\approx 10^\circ$). Esta asimetría es consistente con la ligera oblicuidad que a veces presentan las bandas de opacos con respecto a la foliación S_2 de las imágenes OM.

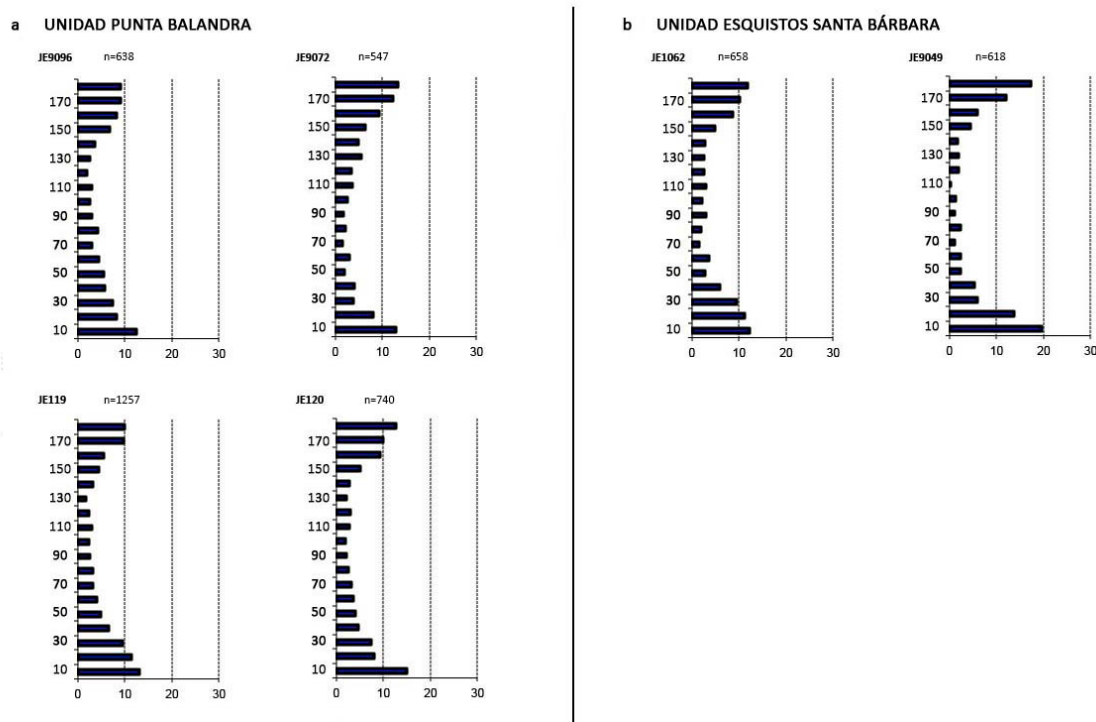


Figura 30: Orientaciones de los cristales de calcita identificados en cada muestra en imágenes de Optical-CL con respecto a la foliación S_2 (dirección X). En el eje de abscisas se representa el porcentaje relativo de cristales.

3.4.3 Diagramas de Forma-CL

Se ha representado el parámetro S con respecto a la elipticidad diferenciando la población correspondiente a la *f.m.*-CL de las fracciones finas (Fig. 31). Mientras que las fracciones finas muestran valores medios similares a los encontrados en los diagramas de forma-OM ($S \approx 0,7$) los valores encontrados para la *f.m.*-CL es mayor que la encontrada en su equivalente (la *f.m.* de la Fig. 21), lo que es consistente con que un clasto de calcita presenta menor irregularidad que un fenoblasto de calcita deformado por deformación plástica y migración de su borde de grano. La elipticidad media es muy regular y en torno a 2. No se aprecian diferencias significativas entre los diagramas de forma-CL de las dos unidades.

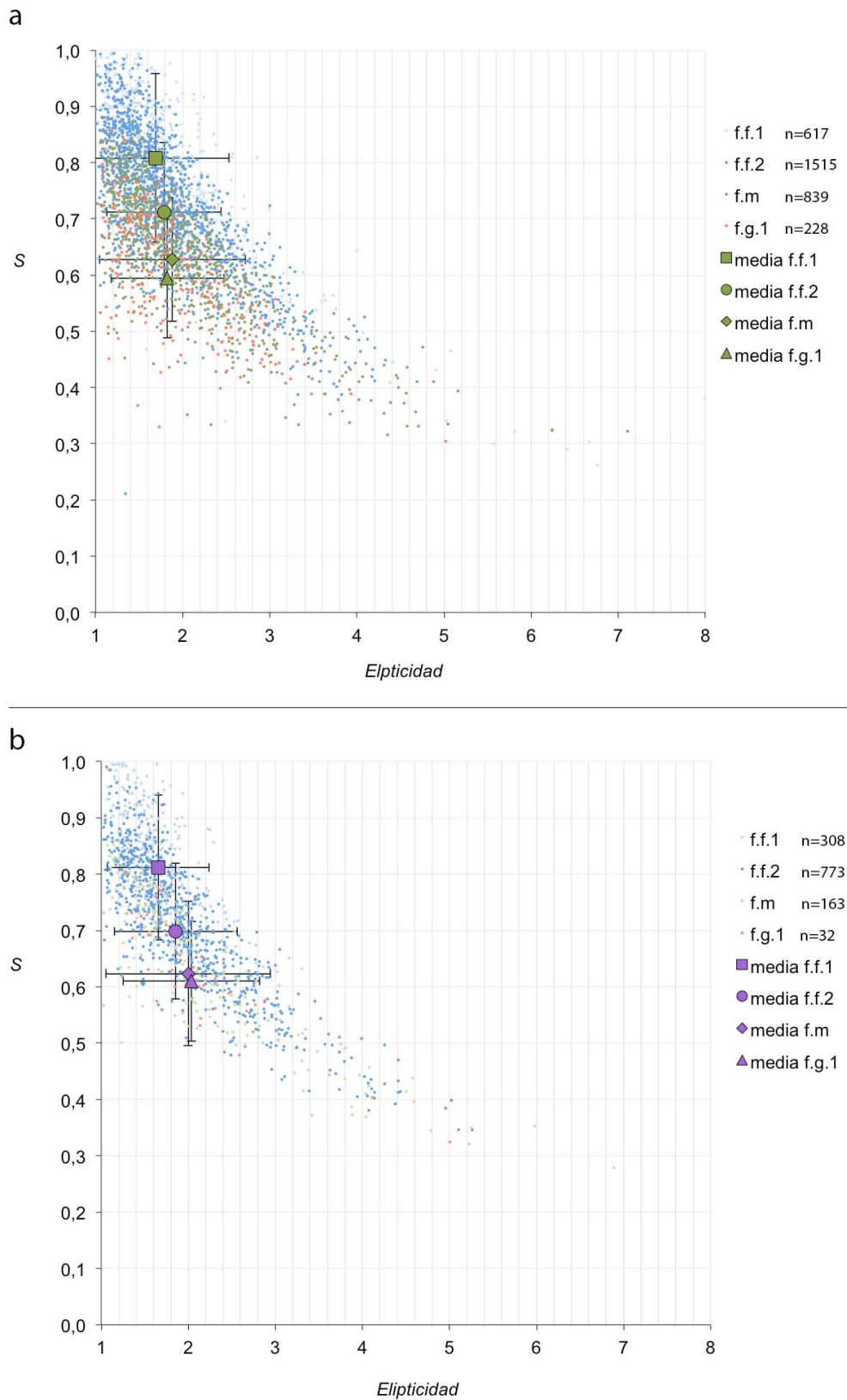


Figura 31: Diagramas que representan la relación entre el parámetro de forma (S) y la elipticidad para cada uno de los cristales de las unidades Punta Balandra (a) y Santa Bárbara (b) analizados sobre imágenes Optical-CL. Se separan las distintas fracciones de tamaño indicando el número de cristales que las componen (n) y se representa para cada una la media geométrica y su desviación estándar.

3.4.4 Diagramas $\log (frecuencia)/ \log r_i$ -CL

Los patrones de distribución obtenidos en los diagramas GSD-CL de la Fig. 29 permiten proyectar todos los datos correspondientes a las muestras de cada unidad agrupados (Fig. 32). Las dos unidades muestran distribuciones que satisfacen ecuaciones potenciales similares, en las que se separan dos poblaciones de tamaños mayores e inferiores a r_k y en los que las fábricas relictas cataclásticas están representadas en las poblaciones correspondientes a $r_i > r_k$.

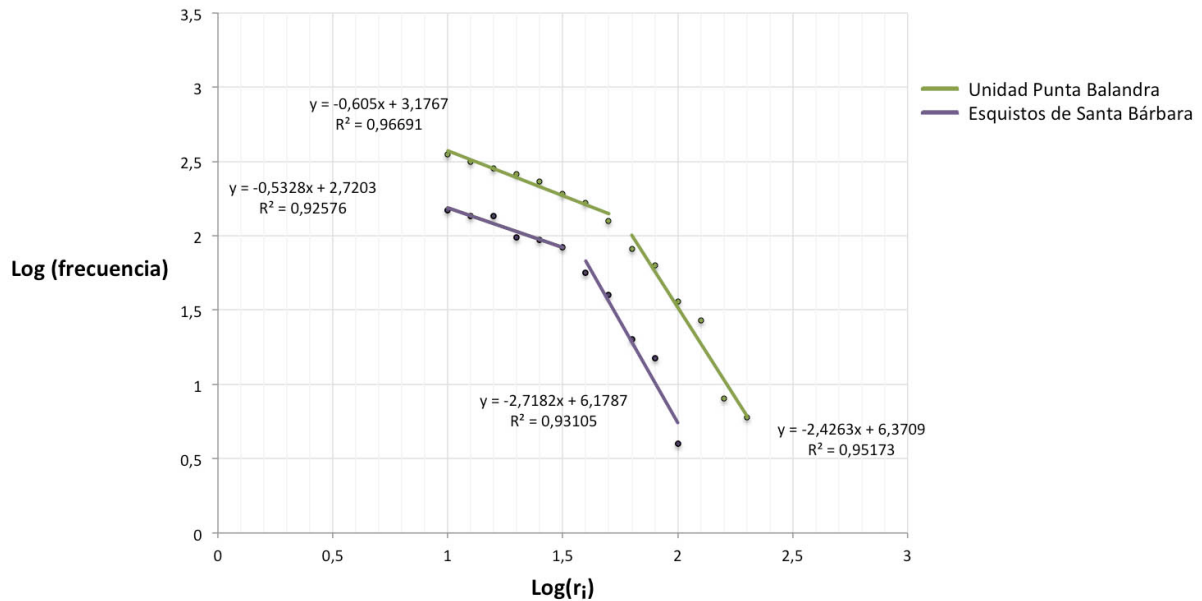


Figura 32: Proyección del $\log r_i / \log (frecuencia)$ para los datos agrupados en intervalos de las unidades Punta Balandra y Esquistos de Santa Bárbara correspondientes al análisis de imágenes de Optical-CL.

Las muestras de los Esquistos de Santa Bárbara tienen un r_k localizado en tamaños de calcitas de radio equivalente de $39,62\mu\text{m}$ y las muestras de la unidad de Punta Balandra tienen un r_k ligeramente mayor. La D de las fracciones finas en ambas unidades tiene valores muy bajos para corresponder con cataclasis desarrolladas en rocas carbonatadas, sin embargo las correspondientes a las $f.m$ -CL tienen unos valores de $D = 2,426$ en las muestras de la unidad de Punta Balandra y $D = 2,718$ consistentes con los observados en este tipo de rocas cataclásticas (Billi, 2007). Estos datos sugieren que las fábricas cataclásticas relictas están más desarrolladas y mejor preservadas en los mármoles de los Esquistos de Santa Bárbara que en los de la unidad de Punta Balandra.

DISCUSIÓN

Los resultados aportados por el análisis microtectónico de los mármoles y calcoesquistos del Complejo de Samaná muestran una historia de exhumación muy compleja. Las microestructuras cataclásticas relictas observadas en las imágenes de Optical-CL demuestran que la cataclasis estuvo relacionada con el desarrollo incipiente de la foliación planar y con procesos de disolución metasomáticos en los que se produjo la concentración de opacos y material insoluble. Con este criterio se rastreó en las imágenes OM la distribución de material insoluble presentándose no sólo como una foliación sub-paralela a la S_2 , sino también como pseudomorfos “fantasmas” de otras fases minerales y como parches en el núcleo de algunos fenoblastos y agregados policristalinos de calcita. Sin embargo, la intervención de cataclasis, procesos de disolución metasomáticos y de deformación plástica intracrystalina en los mármoles y calcoesquistos implica importantes cambios en las condiciones de deformación en presencia de fluidos (Rutter, 1974; 1983; 1995; Fernández et al., 2011). Estos cambios se produjeron durante la exhumación de estas unidades y quedaron registrados en las diferencias termobarométricas entre el estadio metamórfico M_1 y el M_2 , pero también en los registros de paleoesfuerzos medidos con la incidencia del maclado mecánico (Rowe y Rutter, 1990) o con el tamaño de grano de los cristales de calcita recrystalizados dinámicamente (Rutter, 1995). Se ha constatado que la deformación plástica en la calcita se produjo en unas condiciones de esfuerzos diferenciales en torno a los 150MPa, aunque alcanzó paleoesfuerzos >300 MPa al comienzo de la deformación plástica. Además, las evidencias microestructurales sugieren que una elevada presión de fluidos debió rebajar suficientemente la resistencia mecánica de los mármoles y calcoesquistos para producir cataclasis en unas condiciones PT que rondaban los 2GPa y los 500°C respectivamente (Escuder-Virue et al., 2011b). Por lo tanto, entre la cataclasis relictas y la deformación plástica se debieron producir unas condiciones de deformación que favorecieran la disolución por presión (Rutter, 1976).

Se ha interpretado la secuencia de los mecanismos dominantes de deformación durante el proceso de exhumación, de acuerdo con la superposición de microestructuras observadas y se discute su rango de estabilidad mecánica. Además, puesto que no se han encontrado inclusiones fluidas de suficiente tamaño para obtener datos fiables, se ha intentado deducir de forma indirecta la presión de fluidos que desencadenó el proceso cataclástico. Finalmente, se discute como la reducción de tamaño de grano intervino en la transición de la cataclasis al *creep* de disolución y que datos sugieren este cambio.

Fernández et al. (2012) analizaron las fábricas de orientación preferente cristalográfica (OCPs) de calcita desarrolladas durante la deformación plástica de los mármoles y calcoesquistos del Complejo de Samaná. Sorprendentemente, las fábricas no son intensas y

además son del mismo tipo en las tres unidades muestreadas. La orientación de los ejes ópticos $\langle c \rangle$ de la calcita y de los polos de los planos de macla $e \{-1018\}$ respecto del plano de foliación S_2 (XY) y de la lineación (X) es ortorrómbica y define un máximo perpendicular al plano de foliación S_2 (Fig. 3). Esta configuración indica que las OCPs se produjeron en un régimen de extensión por aplastamiento, lo que permite interpretar a las figuras de proyección inversa de la Fig. 3 como fábricas del tipo $e+a/h$ (Rutter et al., 1994) de acuerdo con el rango de T aportado en la Tabla 1. La deformación plástica se acomodó por recrystalización dinámica como consecuencia de la migración de borde de grano de los cristales elongados y maclados de calcita. La fracción de tamaño $f.f.2$ del análisis GSD (Figs. 19 y 29) se interpretó como la correspondiente a la de los cristales recrystalizados por migración de borde de grano. El paleoesfuerzo que indica esta fracción de tamaño varía entre los 120MPa y los 180MPa mientras que la recrystalización dinámica del cuarzo encontrado en algunos budines de los calcoesquistos indica valores inferiores (Muestra JE9059* de la Tabla 1). Puesto que los paleoesfuerzos medidos por la incidencia de maclado (Tabla 1) indican valores que superaron los 300MPa se deduce que la deformación plástica se produjo en condiciones de aumento del esfuerzo diferencial durante el final del proceso de exhumación.

Sin embargo, la cataclasis que se observa en las fábricas relictas (Figs. 23, 24, 25, 26 y 28), sugieren una situación inversa al comienzo del proceso de exhumación. Las posibilidades de producir cataclasis en rocas subducidas requieren una elevada presión de fluidos para que se relaje el esfuerzo efectivo (i.e: Petrini y Podladchikov, 2000) y se produzca cataclasis en la rocas como respuesta sísmica (i.e: Jamtvelt et al., 2000) o asísmica. Catlos y Sorensen (2003) indican que durante la eclogitización de las rocas del Complejo de Samaná se produjeron procesos metasomáticos durante al menos 25My, lo que indica que no sólo existían fluidos en las rocas subducidas sino que interactuaron con estas durante un largo periodo de tiempo.

La ausencia de inclusiones fluidas de tamaño suficiente para obtener datos fiables de la presión de fluidos y de su composición (i.e: Zheng, 2009), nos obliga a intentar hacer una estimación indirecta a partir de los equilibrios termodinámicos de las reacciones desencadenadas entre las fases minerales que reaccionaron durante el desarrollo de la foliación S_2 . El modelo termodinámico obtenido en un esquistos intercalado en la unidad de Punta Balandra sugiere un porcentaje del volumen de agua sobre roca total del 1,2 a 1,8 % a 2GPa (Fig. 33). Además en este modelo se observa como la presión de fluidos aumentaría como consecuencia del aporte de H_2O en roca total durante el proceso retrógrado. El análisis GSD-CL aporta datos que sugieren que el aumento de volumen de la roca por cataclasis debió ser mayor ($7\% < \Delta V < 15\%$). El ΔV y las variaciones metasomáticas en la composición de los carbonatos, registradas por las variaciones en la luminiscencia de las imágenes Optical-CL, sugieren que hubo aportes extras de fluidos en condiciones profundas. Aunque los modelos termo-mecánicos de Yamato (2007) sugieren que la sobrepresión o descompresión producida por la presión de fluidos en las cuñas de subducción no son determinantes para producir su exhumación a velocidades razonables ($1-6 \text{ mmyr}^{-1}$), todos los datos aportados en este trabajo

y en otros trabajos previos del Complejo de Samaná indican que una elevada presión de fluidos fue determinante en el proceso de eclogitización de las rocas (Catlos y Sorensen, 2003; Escuder-Viruete et al., 2011b), en el desarrollo de cataclasis a gran profundidad y en las elevadas velocidades de exhumación (Fernández et al., 2012).

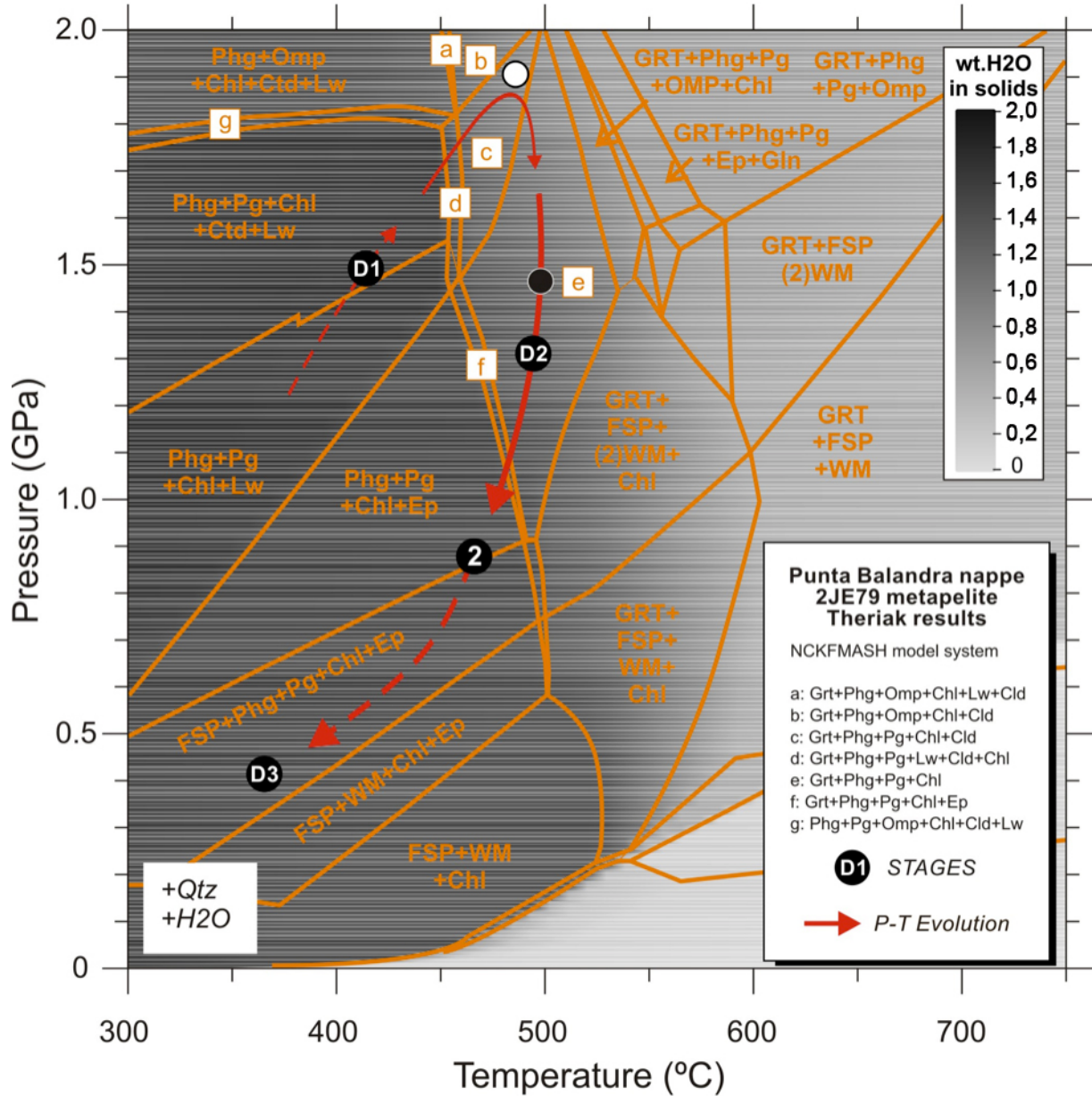


Figura 33: Diagrama de equilibrio de fases *PT-t* e isopletras para (a) granate (XPrp, XGr y XAlm; b, d y f), fengita (XSi p.f.u.; c) y cloritoide (XFe; e) calculadas a partir de los datos de microsonda tomados en las principales fases minerales del micaesquisto 2JE79 de la unidad de Punta Balandra. El diagrama está calculado con el modelo de roca total [SiO₂/Al₂O₃/FeO/MgO/CaO/Na₂O/K₂O=3.8:1.5:0.65:0.2:0.05:0.16:0.3] para roca saturada en H₂O con el software *Theriak-Domino* (De Capitani, 1994). Se indica el porcentaje en H₂O en roca total en el diagrama con tonos de intensidad de gris (ver leyenda) respecto al desarrollo de la foliación milonítica principal S₂ (con la anchura de la línea que define la trayectoria *PT* retrógrada entre el clímax metamórfico y el final de la segunda fase de deformación D₂).

Comparando los diagramas del análisis GSD realizado en imágenes OM y CL de las unidades que presentan evidencias de la cataclasis relictas se han encontrado diferencias, pero también semejanzas. Las diferencias se interpretan como características exclusivas de la cataclasis relictas y las similitudes como resultado de los mecanismos de deformación que pudieron activarse durante el proceso de exhumación. Puesto que la cataclasis es un mecanismo escalo-independiente (Blenkinsop, 1991) su registro en los diagramas $\log(\text{frecuencia})/\log r_i$ debe corresponder a la fracción de tamaños cuyo ajuste está de acuerdo con los valores de D entre 2 y 3,5, dado que son los valores de D habituales en rocas de falla carbonatadas (Billi, 2007). En efecto, la fracción de tamaño $r_i > 40\mu\text{m}$ presenta distribuciones de D que varía entre 2,4 y 2,7 en las fábricas analizadas mediante las imágenes CL (Fig. 32) y entre 2,7 y 3,8 en las fábricas analizadas mediante imágenes OM (Fig. 22) para la fracción de tamaño de $r_i > 214\mu\text{m}$ que están dentro del rango de los valores obtenidos por otros autores para este tipo de cataclasis. Sin embargo en las fracciones de tamaño de grano más fino, aunque el ajuste lineal de la distribución de tamaños de grano es bueno, el valor de D disminuye drásticamente hasta valores muy por debajo de los habituales en las cataclasis calcáreas que sugieren la entrada de otros mecanismos de deformación escalo-dependientes. Es decir, la aparición de mecanismos dependientes del tamaño de grano como el *creep* de disolución-precipitación (Wassmann y Stöckhert, 2013). Estos autores indican que cuando este mecanismo controla la deformación en rocas metamórficas de alta presión, los esfuerzos son demasiado bajos para producir deformación plástica y que la presión de fluidos debe igualar la presión litostática para que se produzca la fracturación y molienda de la fracción cataclástica. A la luz de nuestros resultados parece que el proceso cataclástico se anticipa al *creep* de disolución-precipitación, porque el *creep* de disolución-precipitación está controlado por el tamaño de grano fino y requiere una caída del esfuerzo efectivo. Ambas características, reducción de tamaño de grano y caída del esfuerzo efectivo pudieron acontecer como consecuencia del proceso cataclástico. La elevada y constante velocidad de exhumación tectónica (112,5MPa/Myr) a la que se exhumaron las tres unidades indican, no obstante, que los esfuerzos efectivos debieron ser altos durante la mayor parte del proceso de exhumación. En este contexto resulta razonable suponer que a partir de un umbral de esfuerzos efectivos comenzara a operar como mecanismo dominante la deformación plástica intracrystalina.

La comparación de nuestros resultados con la evolución de otros complejos carbonatados de alta presión indica un patrón de deformación similar. Así, Bestmann et al. (2000) encontraron en las zonas de cizalla desarrolladas en mármoles de la isla de Thassos (Grecia) que la deformación coaxial dominante en niveles profundos de la corteza dejó paso a simetrías monoclinicas como resultado de la deformación en zonas de cizalla más restringidas y someras. Por otra parte Ulrich et al. (2002) indican también el control que ejerció el refinamiento del tamaño de grano en el *creep* de disolución-precipitación registrado por los mármoles del borde E del Macizo de Bohemia y sugieren que en las fracciones de tamaño de grano fino pudo operar también el deslizamiento de borde de grano.

CONCLUSIONES

1. El análisis GSD de los mármoles y calcoesquistos de las unidades de Punta Balandra y Esquistos de Santa Bárbara muestra una historia del proceso de exhumación muy compleja y fuertemente controlada por la alta presión de fluidos.
2. Se ha encontrado una deformación relictas cataclástica en las imágenes Optical-CL que se correlaciona con el bandeo composicional de las imágenes OM, marcado por la concentración de material insoluble y dispuesto sub-paralelo a la foliación S_2 .
3. El análisis muestra fábricas con una distribución $\log(\text{frecuencia})/\log r_i$ de tipo potencial, en la que se definen dos fracciones.
4. La fracción de mayor tamaño ($1,6 < \log r_i < 2,4$) se caracteriza por presentar una dimensión fractal $2,17 < D < 2,97$, típica de cataclasitas carbonatadas.
5. La fracción de menor tamaño ($0,9 < \log r_i < 1,7$) se caracteriza por una $D < 1,1$, por debajo del rango que caracteriza los procesos de fragmentación e indica que el mecanismo de deformación dominante fue escalo-dependiente.
6. Los parámetros de forma de esta fracción junto con las microestructuras relacionadas con procesos de disolución, posteriores al proceso cataclástico, indican que el mecanismo dominante debió ser el *creep* de disolución-precipitación.
7. Finalmente, el aumento de los esfuerzos diferenciales durante el proceso de exhumación bloqueó el *creep* de disolución a favor de la deformación plástica intracrystalina.
8. La secuencia de los mecanismos de deformación encontrada en el proceso de exhumación es por lo tanto inversa y comenzó con cataclasis de la fábrica original en condiciones de alta P y moderada T .

BIBLIOGRAFÍA

- Bestmann, M., Kunze, K. y Matthews, A. (2000): Evolution of a calcite marble shear zone complex on Thassos Island, Greece: microstructural and textural fabrics and their kinematic significance. *Journal of Structural Geology*, 22: 1789-1807.
- Blenkinsop T. G. (1991): Cataclasis and processes of particle size reduction. *Pure and Applied Geophysics*, 136: 59-86.
- Billi, A. (2007): On the extent of size range and power law scaling for particles of natural carbonate fault cores. *Journal of Structural Geology*, 29: 1512-1521.
- Burkhard, M. (1993): Calcite twins, their geometry, appearance and significance as stress-strain markers and indicators of tectonic regime: a review. *Journal of Structural Geology*, 15: 351-368.
- Catlos, E.J. y Sorensen S.S. (2003): Phengite -based chronology of K- and Ba-rich fluid flow in two paleosubduction zones. *Science*, 299: 92-95.
- Draper G. y Lewis J.F. (1991): Geologic map of the Central Dominican republic (1:150.000). En: Mann P., Draper G. y Lewis J. F., (Eds.), *Geological and Tectonic Development of the North American-Caribbean Plate Boundary in Hispaniola. Geological Society America Special Paper*, 262 (plates).
- Draper G., Mann P. y Lewis J.F. (1994): Hispaniola. En: Donovan S.K. y Jackson, T.A. (Eds.), *Caribbean Geology: An Introduction. University of the West Indies Publishers Association, Kingston, Jamaica*, pp. 129-150.
- De Capitani, C. (1994): Gleichgewichts-Phasendiagramme: Theorie und Software. Beihefte zum European Journal of Mineralogy, 72. Jahrestagung der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft, 6, 48.
- Epstein, B. (1947): The mathematical description of certain breakage mechanisms leading to the logarithmicnormal distribution. *J. Franklin Inst.* 244: 471-477.
- Escuder Viruete, J. 2004. Petrología y Geoquímica de Rocas Ígneas y Metamórficas del Proyecto K (Sysmin): Hojas de Dajabón, Martín García, Loma de Cabrera, Santiago Rodríguez, Monción, Restauración, Jicomé, Bánica, Arroyo Limón y Lamedero. Informe Complementario al Mapa Geológico de la República Dominicana a E. 1:50.000. *IGME-BRGM-INYPSA, Santo Domingo*, 130 pp.

- Escuder-Virue, J. y Pérez-Estaún, A. (2006): Subduction-related P-T path for eclogites and garnet glaucophanites from the Samaná Peninsula basement complex, northern Hispaniola. *International Journal of Earth Sciences*, 95 (6): 995-1017.
- Escuder-Virue, J. (2008a): Mapa Geológico de la República Dominicana E. 1:50.000, Santa Bárbara de Samaná (6373-IV). *Dirección General Minería, Santo Domingo*, 197 pp.
- Escuder-Virue, J. (2008b): Petrología y Geoquímica de Rocas Ígneas y Metamórficas: Hojas de Las Galeras, Santa Bárbara de Samaná y Sánchez. Informe Complementario al Mapa Geológico de la República Dominicana a E. 1:50.000. *IGME-BRGM, Santo Domingo*, 79 pp.
- Escuder-Virue, J., Friedman, R., Pérez-Estaún, A., Joubert, M. y Weis, D. (2009): U-Pb constraints on the timing of igneous and metamorphic events in the Rio San Juan complex, northern Hispaniola. *VII Congreso Cubano de Geología. Workshop IGCP-544*.
- Escuder-Virue J., Pérez-Estaún A., Booth-Rea G. y Valverde-Vaquero P. (2011a): Tectonometamorphic evolution of the Samaná complex, northern Hispaniola: Implications for the burial and exhumation of high-pressure rocks in a collisional accretionary wedge. *Lithos*, 125: 190-210.
- Escuder-Virue J., Pérez-Estaún A., Gabites J. y Suárez-Rodríguez A. (2011b): Structural development of a high-pressure collisional accretionary wedge: The Samaná complex, Northern Hispaniola. *Journal of Structural Geology*, 33: 928-950.
- Escuder-Virue J. y Pérez-Estaún A. (2013): Contrasting exhumation P–T paths followed by high-P rocks in the northern Caribbean subduction–accretionary complex: Insights from the structural geology, microtextures and equilibrium assemblage diagrams. *Lithos*, 160-161:177-144.
- Fernández F.J., Menéndez-Duarte, R., Aller, J. y Bastida, F. (2005): Application of geographical information system to shape-fabric analysis. In: Microrstructural evolution and physical properties in high-strain zones (I.Burlini and Bruhn eds.) *Geological Society of London Special Publications*, 245: 409-420.
- Fernández F.J., Rutter, E.H., Prior, D. y Gracia-Cuevas, C. (2011): Análisis e interpretación de fábricas tectónicas en rocas carbonatadas cálcicas. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 24 (1-2): 9-30.
- Fernández, F.J., Escuder-Viruet, J., Mariani, E., Prior, D. J. y Pérez-Estaún A. (2012): Calcite deformation induced by high-stress perturbation during the exhumation of the high pressure Samaná complex, Hispaniola Island, Caribbean. *Rock Deformation from Field*

-
- studies, experiments and theory: a meeting in honour of the work of Prof. E.H. Rutter. Abstract Book. *The Geological Society, London*, pp. 26
- Gonçalves Ph., Guillot S., Lardeaux J.M., Nicollet C. y Mercier de Lépinay B. (2000): Thrusting and sinistral wrenching in a pre-Eocene HP-LT Caribbean accretionary wedge (Samaná Peninsula, Dominican Republic). *Geodinamica Acta*, 13: 119-132.
- Granja, J. L. (2005): Geodinámica del borde noreste de la Placa Caribe. *Trabajo de investigación de tercer ciclo, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Geológicas*, 122 pp.
- Jamtveit, B., Austrheim, H. y Malthe-Sørensen, A. (2000): Accelerated hydration of the Earth's deep crust induced by stress perturbations. *Nature*, 408: 75–78.
- Joyce J. (1991): Blueschist metamorphism and deformation on the Samaná Peninsula: a record of subduction and collision in the Greater Antilles. En: Mann P., Draper G. y Lewis J. (Eds.), Tectonic Development of the North America-Caribbean Plate Boundary Zone in Hispaniola: *Geological Society America Special Paper*, 262: 47–75.
- Lewis, J.F. y Draper, G. (1990) Geological and tectonic evolution of the northern Caribbean margin: Decade of North American Geology, v. H: The Caribbean, *Geological Society of America*, pp. 77-140
- Long, J.V.P. y Agrell S.O. (1965): The cathodoluminescence of minerals in thin section. *Mineralogical Magazine*, 34: 318-326
- Mann P., Calais E., Ruegg J.C., DeMets C., Jansma P.E. y Mattioli G.S. (2002): Oblique collision in the northeastern Caribbean from GPS measurements and geological observations. *Tectonics*, 21: 1057-1082.
- Marshall, J.D. (1988): Cathodoluminescence of geological materials. *Unwin Hyman*, 146pp.
- Pérez-Estaún A., Hernaiz P. P., Lopera E., Joubert M. y grupo SISMYN (Escuder-Viruete J., Díaz A., Monthel J., García-Senz J., Ubrien P., Contreras F., Bernárdez E., Stein G., Deschamps I., García-Lobón J. L. y Ayala C.) (2007): Geología de la República Dominicana: de la construcción de arco-isla a la colisión arco-continente. *Boletín Geológico y Minero* 118: 157-174.
- Petrini, K. y Podladchikov, Y. (2000): Lithospheric pressure-depth relationship in compressive regions of thickened crust. *Journal of Metamorphic Geology*, 18: 67-77.
- Rowe, K.J. y Rutter, E.H. (1990): Palaeostress estimation using calcite twinning: experimental calibration and application to nature. *Journal of Structural Geology*, 12: 1-17.

- Rutter, E.H. (1974): The influence of temperatura, strain rate and interstitial water in the experimental deformation of calcite rocks. *Tectonophysics*, 22: 311-334.
- Rutter, E. H. (1976): The kinetics of rock deformation by pressure solution. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 283 (A): 203-219.
- Rutter, E. H. (1983): Pressure solution in nature, theory and experimet. *Journal of the Geological Society*, 140: 725-740.
- Rutter, E.H., Casey, M. And Burlini, L. (1994): Preferred crystallographic orientation development during the plastic and superplastic flow of calcite rocks. *Journal of Structural Geology*, 16: 1431-1446.
- Rutter, E.H. (1995): Experimental study of the influence of stress, temperature, and strain on the dynamic recrystallization of Carrara marble. *Journal of Geophysical Research* 100(B12): 24.651-24.663.
- Sommer, S.E. (1972) Cathodoluminescence of carbonates, 1 Characterization of cathodoluminescence from carbonate solid solutions. *Chemical Geology*, 9: 257-273
- Stipp, M. y Tullis, J. (2003). The recrystallized size piezometer for quartz. *Geophysical Research Letters*, 30, 21, 2088. doi:10.1029/2003GL018444.
- Turcotte D.L. (1986): Fractals and Fragmentation. *Journal of Geophysical Research*, 91(B2): 1921-1926.
- Ulrich, S., Schulmann, K. y Casey, M. (2002): Microstructural evolution and rheological behavior of marbles deformed at different crystal levels. *Journal of Structural Geology*, 24: 979-995.
- Wassmann, S. y Stöckhert, B. (2013): Rheology of the plate interface-Dissolution precipitation creep in high pressure metamorphic rocks. *Tectonophysics*, 608: 1-29.
- Yamato, P., P. Agard, E. Burov, L. Le Pourhiet, L. Jolivet, y C. Tiberi (2007): Burial and exhumation in a subduction wedge: Mutual constraints from thermomechanical modeling and natural P-T-t data (Schistes Lustre's, western Alps). *Journal of Geophysical Research*, 112(B7): 410.
- Zheng, Y-F. (2009): Fluid regime in continental subduction zones: petrological insights from ultrahigh-pressure metamorphic rocks. *Journal of the Geological Society*, 166: 763-782.