



Instituto Tecnológico
GeoMinero de España

X 62307

INVENTARIO NACIONAL DE WOLLASTONITA

1999-2000



Secretaría de Estado de Aguas y Costas
Ministerio de Medio Ambiente

**INVENTARIO NACIONAL
DE
WOLLASTONITA**

1.999-2.000

El presente Proyecto, integrado dentro del **Convenio Marco** suscrito entre la **DIRECCIÓN GENERAL DE MINAS del Ministerio de Industria y Energía (MINER)** y el **INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA**, se realizó entre julio de 1999 y abril de 2000, por el Área de Rocas y Minerales Industriales del ITGE, con la colaboración parcial de Ingeniería y Proyectos, S.A. (INYPISA).

El equipo de trabajo estuvo constituido por:

José Manuel Baltuille Martín (Geólogo Europeo, ITGE)
Jesús Rey de la Rosa (Geólogo, INYPISA)
Jesús Vega Roderer (Geólogo, ITGE)
José M. Zapardiel Palenzuela (Dr. Ing. de Minas, DGM-MINER)

Se contó con la inestimable colaboración de:

Carlos Alcalde Molero (Geólogo, Junta de Extremadura)
Benito Caballero Martín (Geólogo, Almagrera, S.A.)
José M. García Marcos (Geólogo, Serv. Territ. Industria Salamanca-Junta de Castilla y León)
Alfonso S. Gracia Plaza (Dr. en Geología, Cía. Minera Ilustración, S.L.)
José Luis Feria (Ing. Técnico de Minas)
Alfonso de las Llanderas López (Geólogo, Junta de Extremadura)
Miguel Martínez de Paz (Ing. Téc. de Minas, Serv. Territ. Industria Salamanca-Junta de Castilla y León)
Salvador Mirete Mayo (Geólogo)

bajo Dirección y Supervisión de la DGM (J.M. Zapardiel) y del ITGE (J.M. Baltuille Martín).

ÍNDICE

	<u>Pág.</u>
INTRODUCCIÓN	1
I.-GEOLOGÍA	2
1.- MINERALOGÍA Y PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS	3
2.- GÉNESIS Y TIPOLOGÍA DE YACIMIENTOS	7
3.- DISTRIBUCIÓN MUNDIAL DE YACIMIENTOS	9
3.1.- ESTADOS UNIDOS (EE.UU.)	9
3.2.- CHINA	13
3.3.- INDIA	14
3.4.- FINLANDIA	15
3.5.- MÉJICO	17
3.6.- ÁFRICA	18
3.6.1.- KENYA	18
3.6.2.- NAMIBIA	18
3.6.3.- REPÚBLICA DE SUDÁFRICA	18
3.6.4.- MARRUECOS	18
3.6.5.- SUDÁN	18
3.7.- AMÉRICA	19
3.7.1.- CANADÁ	19
<u>3.7.1.1.- Ontario</u>	19
<u>3.7.1.2.- Quebec</u>	20
<u>3.7.1.3.- Columbia Británica</u>	20
<u>3.7.1.4.- Territorio del Yukón</u>	22
3.7.2.- CHILE	22
3.7.3.- CUBA	23
3.8.- ASIA	23
3.8.1.- PAKISTÁN	24
3.9.- EUROPA	24
3.9.1.- GRECIA	24
<u>3.9.1.1.- Xhanti</u>	23
<u>3.9.1.2.- Panorama</u>	25

3.9.2.- TURQUÍA	25
3.9.3.- SUECIA	26
<u>3.9.3.1.- Limmingen</u>	26
<u>3.9.3.2.- Silverön</u>	26
<u>3.9.3.3.- Hulå</u>	29
3.9.4.- SERBIA	29
3.9.5.- REPÚBLICA DE CHEQUIA	29
3.9.6.- POLONIA	29
3.10.- EX-URSS / RUSIA	30
3.10.1.- ASIA CENTRAL	30
<u>3.10.1.1.- Uzbekistán</u>	30
<u>3.10.1.2.- Tadjikistán</u>	30
<u>3.10.1.3.- Kazaistán</u>	30
3.10.2.- ASIA ORIENTAL	31
3.10.3.- RUSIA NOROCCIDENTAL	31
3.10.4.- ÁREA DE SAN PETERSBURGO	31
3.10.5.- RUSIA SUDOCCIDENTAL	31
<u>3.10.5.1.- Kabardinos-Balkaira</u>	31
3.11.- OCEANÍA	31
3.11.1.- NUEVA ZELANDA	31
3.11.2.- AUSTRALIA	31
4.- YACIMIENTOS ESPAÑOLES	32
4.1.- MÉRIDA (BADAJOZ)	32
4.2.- AROCHE (HUELVA)	42
4.3.- COLMENAR VIEJO (MADRID)	56
4.3.1.- CARACTERÍSTICAS DE LA EXPLOTACIÓN	58
4.3.2.- EQUIPAMIENTO	58
4.3.3.- PROCESADO	58
4.3.4.- UBICACIÓN DEL COMPLEJO	59
4.4.- ALDEA DEL OBISPO (SALAMANCA)	62
4.5.- OTROS INDICIOS	68
4.5.1.- Andalucía	69
<u>4.5.1.1.- Santa Olalla (Huelva)</u>	69
4.5.2.- ARAGÓN	69
<u>4.5.2.1.- Panticosa (Huesca)</u>	69

4.5.3.- ASTURIAS	69
<u>4.5.3.1.- Carlés-Salas (Asturias)</u>	69
4.5.4.- CASTILLA Y LEÓN	69
<u>4.5.4.1.- Fermoselle (Zamora)</u>	69
4.5.5.- CATALUÑA	69
<u>4.5.5.1.- Gualba (Barcelona)</u>	69
<u>4.5.5.2.- Nuria (Girona)</u>	70
<u>4.5.5.3.- La Cerdanya (Lleida)</u>	70
4.5.6.- COMUNIDAD VALENCIANA	71
<u>4.5.6.1.- Lugar Nuevo de Fenollet (Valencia)</u>	71
4.5.7.- EXTREMADURA	72
<u>4.5.7.1.- Peraleda de San Román (Cáceres)</u>	72
4.5.8.- MADRID	72
<u>4.5.8.1.- Puerto de Somosierra (Madrid)</u>	72
<u>4.5.8.2.- Puerto de Navacerrada (Madrid)</u>	75
<u>4.5.8.3.- Villa del Prado (Madrid)</u>	75
4.5.9.- OTROS SKARNS	77
<u>4.5.9.1.- Macizo de Peñalara (Madrid)</u>	78
<u>4.5.9.2.- Otero de Herreros (Segovia)</u>	78
<u>4.5.9.3.- El Caloco (Segovia)</u>	79
<u>4.5.9.4.- San Salvador de Cantamuda (Palencia)</u>	79
II.-TECNOLOGÍA	81
5.- EXPLORACIÓN Y EVALUACIÓN DE YACIMIENTOS	82
6.- MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN	84
7.- PROCESADO	85
8.- SUBPRODUCTOS Y PRODUCTOS DERIVADOS	88
III.-FACTORES PRODUCTIVOS	89
9.- PRODUCCIÓN MUNDIAL Y PRINCIPALES PAÍSES PRODUCTORES	90
9.1.- ESTADOS UNIDOS (EE.UU.)	93
9.1.1.- NYCO MINERALS INC.	93
9.1.2.- R.T. VANDERBILT CO. INC.	96
9.1.3.- OTROS	97
9.2.- CHINA	97
9.2.1.- LISHU WOLLASTONITE MINING CORP.	98

-		
-		
-		
-	9.2.2.- OTROS	100
-	9.3.- INDIA	103
-	9.3.1.- WOLKEM INDIA LTD.	104
-	9.4.- FINLANDIA	107
-	9.4.1.- PARTEK INDUSTRIAL MINERALS	107
-	9.5.- MÉJICO	110
-	9.5.1.- MINERA NYCO, S.A. DE C.V.	110
-	9.5.2.- GENERAL DE MINERALES, S.A. (GEMINSA)	112
-	9.5.3.- MINERALES Y MAQUILAS DEL NORTE, S.A. DE C.V. (MMN)	112
-	9.5.4.- OTROS	113
-	9.6.- ÁFRICA	113
-	9.6.1.- KENYA	113
-	9.6.2.- NAMIBIA	114
-	9.6.3.- REPÚBLICA DE SUDÁFRICA	114
-	9.6.4.- MARRUECOS	115
-	9.7.- AMÉRICA	115
-	9.7.1.- CANADÁ	115
-	9.7.1.1.- Ontario	115
-	9.7.1.2.- Quebec	116
-	9.7.1.3.- Columbia Británica	116
-	9.7.2.- CHILE	117
-	9.7.3.- CUBA	117
-	9.8.- ASIA	117
-	9.8.1.- PAKISTÁN	117
-	9.8.2.- COREA DEL NORTE	117
-	9.8.3.- JAPÓN	117
-	9.9.- EUROPA	117
-	9.9.1.- GRECIA	117
-	9.9.2.- TURQUÍA	118
-	9.9.3.- SUECIA	119
-	9.9.4.- SERBIA	119
-	9.9.5.- REPÚBLICA DE CHEQUIA	119
-	9.10.- EX-URSS / RUSIA	119
-	9.10.1.- ASIA CENTRAL	120
-	9.10.1.1.- Uzbekistán	120
-		

-		
-		
-		
-	<u>9.10.1.2.- Tadjikistán</u>	120
-	<u>9.10.1.3.- Kazajstán</u>	120
-	9.10.2.- ASIA ORIENTAL	120
-	9.11.- OCEANÍA	120
-	9.11.1.- NUEVA ZELANDA	120
-	9.11.2.- AUSTRALIA	121
-	10.- COMERCIALIZADORES Y PROCESADORES	122
-	11.- WOLLASTONITA SINTÉTICA	123
-	11.1.- ALEMANIA	124
-	11.2.- BÉLGICA	126
-	11.3.- DINAMARCA	126
-	11.4.- OTROS	126
-	11.4.1.- ITALIA	126
-	11.4.2.- ESTADOS UNIDOS	126
-	11.4.3.- BRASIL	126
-	11.4.4.- JAPÓN	127
-	11.4.5.- CHINA	127
-	11.4.6.- ESPAÑA	127
-	IV.- APLICACIONES Y MERCADOS	128
-	12.- PRINCIPALES APLICACIONES	129
-	12.1.- CERÁMICA	130
-	12.1.1.- BALDOSAS CERÁMICAS	132
-	12.2.- CARGAS EN PLÁSTICOS, RESINAS Y CAUCHOS	136
-	12.2.1.- TRATAMIENTO SUPERFICIAL	139
-	12.2.2.- PLÁSTICOS DE AUTOMÓVILES	141
-	12.2.3.- PIEZAS MOLDEADAS DE INYECCIÓN REFORZADA (RRIM)	141
-	12.2.4.- OLEFINAS TERMOPLÁSTICAS (TPO)	142
-	12.2.5.- POLIAMIDAS - NYLON 6 Y NYLON 6/6	143
-	12.2.6.- OTRAS APLICACIONES	143
-	12.2.7.- SITUACIÓN MUNDIAL	143
-	12.3.- REEMPLAZAMIENTO DE ASBESTOS	145
-	12.4.- FUNDENTES METALÚRGICOS	148
-	12.5.- PINTURAS Y REVESTIMIENTOS	149
-	12.6.- OTROS MERCADOS	151
-	12.6.1.- VIDRIO	151
-		

INTRODUCCIÓN

La wollastonita, denominada así en honor de William Hyde Wollaston (1766-1828), químico y mineralogista inglés e inventor del goniómetro, es un metasilicato cálcico que tiene la fórmula SiO_3Ca . En contraste con otros minerales industriales empleados en la cerámica y las cargas, la wollastonita es proporcionalmente un recién llegado a la escena.

Este mineral acicular, de color blanco o marrón, estuvo sin explotar hasta los años 30; antes de esto, sólo era considerado por los geólogos como un mineral accesorio de los skarns. La primera referencia que se tiene de un minado de wollastonita se remonta a 1933 y se trataba de una pequeña explotación en Randsburg (California) para producir fibra mineral (Power, 1986). La producción a gran escala no se materializa, realmente, hasta el descubrimiento de yacimientos de alta calidad en las proximidades de Willsboro (estado de Nueva York), en los años 50.

La propiedad más característica de este mineral, la acicularidad, es la principal razón para su ascenso a finales de la década de los 70 y durante los 80, como carga de refuerzo y como sustituto de los asbestos y de la fibra de vidrio molida de fibra corta. La wollastonita se utiliza en aplicaciones que varían desde azulejos cerámicos a frenos de automóvil, desde paneles de aislamiento térmico a revestimientos industriales de protección y desde la fabricación de parachoques para automóviles hasta bolas para el juego de bolos.

Actualmente se producen más de 500.000 t, con explotaciones en un reducido número de países y con un permanente avance en su aprovechamiento industrial, casi siempre como materia prima secundaria en cuanto a su cantidad pero que aporta un importantes valor añadido al producto final.

EE.UU. junto con China son los principales productores de wollastonita, seguidos de India, Méjico y Finlandia. Mientras que las mayores áreas de consumo son EE.UU., Europa y el Lejano Oriente.

1.- MINERALOGÍA Y PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

La wollastonita es un inosilicato, del grupo de los piroxenoides, que tiene una composición teórica del 48.3 % de CaO y 51.7 % de SiO₂; y donde el Fe, Mn, Mg o Sr pueden sustituir a alguno de los Ca. Los minerales asociados más comunes son: granate, diópsido, calcita, cuarzo, tremolita, feldespato cálcico, idocrasa, epidota, apatito y esfena.

Existen tres modificaciones naturales del silicato cálcico: una forma de alta temperatura, denominada pseudowollastonita (SiO₃Ca-β) y dos formas de baja temperatura (SiO₃Ca-α) que, de acuerdo con la normativa de la International Mineralogical Association (IMA), se designan como wollastonita-Tc y wollastonita-2M (antes denominada parawollastonita), según cristalicen en el sistema triclinico o monoclinico, respectivamente. La wollastonita-Tc representa la modificación triclinica pinacoidal del compuesto Si₃O₉Ca₃, el cual puede también cristalizar en forma de pseudowollastonita y la wollastonita-2M, que representan la modificación triclinica pseudo hexagonal y la monoclinica prismática (Dominguez et al., 1968).

La conversión de wollastonita-Tc en pseudowollastonita se produce a los 1.120 °C e implica un aumento del coeficiente de expansión y un cambio de color. La wollastonita pura, de color blanco, puede cambiar a tintes cremosos o a distintas tonalidades del rojo o del marrón. Este cambio de color se debe a la presencia de Fe y/o Sr.

En los trabajos relacionados con la industria del cemento y la cerámica se utiliza una nomenclatura totalmente contraria, formulándose SiO₃Ca-α la pseudowollastonita y SiO₃Ca-β las formas de baja temperatura.

La wollastonita presenta una exfoliación perfecta paralela a los pinacoides tercero {001} y primero {100}, dando los fragmentos exfoliados un alargamiento paralelo al eje cristalográfico *b* (Dana y Hurlbut, 1960). A causa de su único plano de exfoliación la wollastonita se rompe, durante el machaqueo y la molienda, en partículas laminares y aciculares, dando una acicularidad variable. Esta morfología de la partícula aporta mucha resistencia a los productos finales y es una variable de considerable importancia en los mercados del mineral.

La acicularidad de la partícula se define por su ratio, que es: "la relación existente entre longitud y anchura o longitud y diámetro del cristal". Las partículas individuales, incluso las más pequeñas, normalmente presentan un ratio de 7:1 o 8:1 con un diámetro medio de 3.5 μm. La wollastonita comercial puede dividirse en dos categorías o grados:

- producto no acicular o de bajo ratio (LAR = Low aspect ratio): wollastonita de categoría pulverulenta o molida, con un ratio de 3:1 a 5:1 y que se utiliza como cargas en general, en cerámica y en fundentes metalúrgicos.
- producto acicular o de alto ratio (HAR = High aspect ratio): presenta ratios entre 15:1 y 20:1 y se utilizan como cargas funcionales para refuerzos en compuestos polímeros termoplásticos y termosellantes y como sustituto de asbestos.

El brillo en seco y la blancura de la wollastonita son determinantes en su utilización para ciertas aplicaciones en el mundo de las cargas y de la cerámica. Cuando su grado de pureza es alto su color es blanco brillante, aunque las impurezas pueden colorearla en crema o en gris; respecto al brillo, la mayoría de las wollastonitas tienen valores satisfactorios debido a que poseen un bajo contenido en Fe₂O₃. El brillo se determina midiendo la reflectancia del polvo molido finamente, y comparándola con la de un patrón al que se le asigna un brillo de 100, siendo el MgO y el SO₄Ba los dos patrones utilizados. El brillo

G.E. (término utilizado en Norte América), se refiere al que se obtiene con un reflectómetro General Electric. Los productos comerciales de wollastonita tienen, generalmente, un brillo G.E. que varía de 85 a 95.

La pérdida por calcinación (PPC), otra propiedad importante en determinadas aplicaciones de la wollastonita, es el contenido en materia volátil que se elimina al calentar el mineral a 1.000 °C. El vapor desprendido durante el calentamiento es generalmente CO₂, obtenido a partir de la calcita que está íntimamente ligada a la wollastonita; por lo tanto, lo más adecuado para la wollastonita es conseguir eliminar o disminuir el contenido de calcita asociada mediante las técnicas de beneficio. Los productos comerciales obtenidos a partir de la wollastonita tienen valores de PPC que varían desde el 0.5 % al 2 %.

El alto valor del pH de la wollastonita, 9.9 (en solución acuosa al 10 %), es de vital importancia si se utiliza el mineral en la industria de los revestimientos. Los diseñadores de revestimientos utilizan variedades molidas del mineral, como estabilizadores del pH, en pinturas de PVA (acetato de polivinilo) y acrílicas, tanto de interior como de exterior. Se trata de un mineral químicamente inerte, aunque puede ser atacada por CIH concentrado.

En otro orden de cosas, algunas wollastonitas presentan fluorescencia bajo luz ultravioleta, de onda corta u onda larga o ambas, con colores que varían del rosa-anaranjado al amarillo-anaranjado y, más raramente, verde-azulado. Siendo, los ejemplares de Franklin (Nueva Jersey, EE.UU.), particularmente notables por su fluorescencia (Berry y Mason, 1966). A veces, este mineral, puede también mostrar fosforescencia.

Las principales propiedades físicas de la wollastonita quedan reflejadas en la Tabla 1

Tabla 1. Propiedades físicas de la wollastonita	
Sistema cristalino:	Triclinico. Generalmente en cristales tabulares con los pinacoides primero {100} y tercero {001} bien desarrollados
Relación áxica:	$a:b:c = 1.0846:1:0.9658$; $\alpha = 90^\circ 2'$, $\beta = 95^\circ 22'$ y $\gamma = 103^\circ 26'$
Forma y hábito:	masas cristalinas hojosas / acicular
Color:	blanco, a veces crema, gris o verde muy pálido
Dureza:	4.5 a 5.5 en la escala de Mohs
Raya:	blanca
Brillo:	vítreo a perlado en las superficies de exfoliación, que puede ser sedoso cuando es fibroso
Exfoliación:	dos perfectos a 84° y uno bueno
Peso específico:	2.87 a 3.09
Índice de absorción de aceite:	20-25 ml/g
Coefficiente de expansión térmica:	$6.5 \cdot 10^{-6}$ mm/°C
Baja solubilidad en agua:	0.0095 g/cm ³ a 25° C
Punto de fusión:	1.540 °C
Temperatura de inversión:	seudowollastonita (polimorfo de alta temperatura) a 1.120 °C ± 10 °C

Fuente: Modificado de Bauer et al. (1994)

La wollastonita es un mineral muy difundido en las calizas de metamorfismo de contacto. Se encuentran bellos cristales en Cziklowa Romina (Rumania), Banato (Hungria), Chiapas y Aránzazu (Méjico), Pargas y Parheniemi (Finlandia), Langban (Suecia), Hartzburg, Auerbach, Gengenbach y Adelsfurs (Alemania), Broken Hill (Australia), Devonshire (Reino Unido), Tremorgio (Suiza) y Jeffery Mine (Quebec, Canadá).

En los EE.UU. se explota un gran depósito en Willsboro (Nueva York), también se encuentra en Diana (condado de Lewis, Nueva York), Natural Bridge (condado de St. Lawrence, Nueva York), Orange, Utah, Isle Royale (Michigan), Crestmore (condado de Riverside, California), Lone Pine Mine en Independence (condado de Inyo, California) y en Franklin (condado de Sussex, Nueva Jersey). También existen yacimientos en China, India, Chile, República de Sudáfrica, entre otros.

Tabla 2. Principales contribuciones al conocimiento mineralógico de la wollastonita		
AÑOS	INVESTIGADORES	CONTRIBUCIONES
1912	Goldschmidt	Establece las condiciones P-T para la reacción: calcita+cuarzo=wollastonita+CO ₂ ↑
1931	Warren & Biscoe	Demuestran que la wollastonita no pertenece, desde el punto de vista estructural, al grupo de los piroxenos
1933	Bowen et al.	Descubren que la wollastonita forma una serie de soluciones sólidas en el sistema SiO ₃ Ca-SiO ₃ Fe
1935	Peacock	Confirma la naturaleza triclinica de la estructura de la wollastonita-Tc
1941	Osborn & Schairer	Calculan la temperatura de inversión de la wollastonita en pseudowollastonita a 1125°C±10°C
1950	Ito	Reconoce por primera vez reacciones politipicas entre wollastonita-Tc y wollastonita-2M
1956	Harker & Tuttle	Determinan experimentalmente las condiciones de equilibrio para la reacción calcita+cuarzo=wollastonita+ CO ₂ ↑, y establecen un mínimo de 400°C para la formación de la wollastonita.
1956	Heller & Taylor	Detallan las características distintivas de los patrones de difracción de rayos-X (DRX) de la wollastonita-Tc y la wollastonita-2M
1956	Mamedov & Belov	Determinan la estructura cristalina de la wollastonita-Tc
1961	Buerger & Prewitt	Ajustan la estructura propuesta por Mamedov & Belov
1963	Peacor & Prewitt	Realizan una excelente discusión sobre la estructura de la wollastonita en comparación con la de la bustamita
1967	Greenwood	Estudia la reacción de formación de la wollastonita y determina su estabilidad en mezclas supercríticas de H ₂ O y CO ₂
1968	Trojer	Determina la estructura cristalina de la wollastonita-2M mediante DRX
1971	Rutstein	Admite que la estructura de la wollastonita puede acomodar hasta 10 mol. % de Fe y 20 mol. % de Mn
1974	Essene	Descubre que la wollastonita se transforma en un polimorfo de alta presión (wollastonita-II) a presiones superiores a 25 Kb
1978	Ohashi & Finger	Analizan los factores cristalquímicos que controlan la sustitución catiónica en los huecos octaédricos de la wollastonita
1985	Tanner et al.	Estudian experimentalmente los mecanismos y los aspectos cinéticos de la reacción de formación de la wollastonita
1991	Richet et al.	Complementan los datos termodinámicos disponibles sobre la wollastonita y la pseudowollastonita

Fuente: Fernández Caliani, (1995)

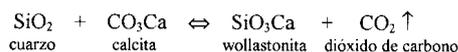
En España se cita wollastonita en Gualba (Barcelona), Mérida (Badajoz), Aldea del Obispo (Salamanca) y Aroche (Huelva), entre otras localidades¹.

La wollastonita-2M es mucho más rara en la naturaleza, se encuentra cerca de Crestmore (California, EE.UU.), Cziklowa (Rumania) y en el Monte Somma (Italia). La seudowollastonita se conoce, fundamentalmente, como un producto sintético; en la naturaleza sólo se ha citado en las rocas metamórficas de una zona al SO de Irán (Dominguez et al., 1968).

¹.- En la colección mineralógica del Museo Geominero del ITGE se registra una muestra de wollastonita, descrita como "agregados radiales blancos de brillo sedoso, acompañados de granate (*¿grosularia?*)", procedente de Mondoñedo (Lugo) e ingresada con fecha 16 de mayo de 1945 (N.A.).

2.- GÉNESIS Y TIPOLOGÍA DE YACIMIENTOS

La wollastonita se forma tanto por procesos metamórficos como magmáticos, que afectan a rocas carbonatadas y a rocas intrusivas ígneas. Químicamente, la formación de wollastonita se lleva a cabo mediante la reacción:



A temperaturas bajas, el cuarzo y la calcita formarán un enlace estable como en ciertos tipos de mármol; pero, si la temperatura asciende de 400 a 450 °C la reacción comienza y se desplaza hacia la derecha hasta que el aporte de calcita o cuarzo se agota, lo que ocurre a una presión cercana a 10^5 Pa. El CO_2 producido aumenta la presión hasta que el vapor escapa y, al aumentar la presión, la temperatura requerida necesita aumentar, posiblemente por encima de los 950 °C.

La temperatura de esta reacción se incrementa con la presión en un sistema cerrado, de donde el CO_2 no puede escapar ($P_{\text{CO}_2} = 506$ Mpa y $T = 800$ °C). Sin embargo, en un sistema abierto, la temperatura de formación de la wollastonita disminuye levemente con el ascenso de la presión ($P_{\text{CO}_2} = 506$ Mpa y $T = 420$ °C) y se forma wollastonita-Tc a 450 °C casi sin presión, mientras que a 1.120-1.160 °C, aparece la pseudowollastonita triclinica o wollastonita- β . Esto sólo ocurre en productos sintéticos (Harben & Kuzvart, 1996).

La composición mineral de cada yacimiento de wollastonita depende de las condiciones geológicas del mismo. De igual forma, el conjunto de minerales que forman la ganga varían de un yacimiento a otro o, incluso, dentro del mismo depósito. Sin embargo, hay tres conjuntos básicos asociados con la wollastonita:

PARAGÉNESIS	YACIMIENTO
wollastonita - granate (grosularita/andradita) - diópsido	Lewis (Nueva York, EE.UU.)
wollastonita - calcita - grafito	Gouverneur (Nueva York, EE.UU.)
wollastonita - diópsido - cuarzo	Lac St. Jean (Quebec, Canadá)

Cada conjunto mineral refleja la composición original de la roca madre y la naturaleza de los subsecuentes eventos metamórficos e intrusivos ígneos (Bauer et al., op. cit.)

En base a su génesis, los depósitos de wollastonita pueden dividirse en tres principales tipos (Harben & Kuzvart, op. cit.):

1. Metasomatismo de contacto o skarn y metamorfismo de contacto o skarnoide: Nueva York (EE.UU.), la antigua URSS, Kopaonik Central (Serbia) y la República Chequia
2. Metamorfismo regional: Montañas Big and Little Maria (California, EE.UU.), Warm Spring Canyon (California, EE.UU.), Code Siding (California, EE.UU.) y el Escudo de Alden (Rusia)
3. Carbonatitas: península de Kola (Rusia), Complejo de Ruri (Kenya), Napak (Uganda) y Santorini (Grecia)

Durante el metamorfismo de contacto de calizas silíceas o areniscas calcáreas, la alteración metasomática puede aparecer cuando el magma aporta sílice, alúmina, hierro y manganeso y se forman entonces varios minerales de skarn, como la wollastonita, el granate y el diópsido (los dos últimos transportan más hierro). La temperatura de formación a profundidades someras se estima en unos 600 °C (Winkler, 1965),

que se incrementa en función de la profundidad. La wollastonita, en esos yacimientos, tiende a ser fuertemente hojosa y constituye una parte importante de la roca. Allí, donde el metamorfismo de contacto únicamente recristaliza la roca mediante el calor y se producen reacciones con pequeños o ningún cambio, se forman depósitos de skarnoide. La wollastonita resultante se presenta en forma de corneanas de contacto, con cristales diminutos de wollastonita que representan el 10-30 % de la roca. Todos los yacimientos de interés comercial provienen de metamorfismo de contacto.

Wollastonita, formada por procesos de metamorfismo regional, aparece en las Montañas Big and Little Maria (California, EE.UU.). Esta wollastonita, que es de grano fino, se presenta en niveles cuyo espesor varía desde varios decímetros a 150 m y se encuentra en un mármol del Paleozoico inferior, con niveles intercalados de diópsido.

Otros yacimientos de wollastonita en California son: Warm Spring Canyon, que se localiza en calizas del Pérmico (un lentejón de 250 m de largo y 10 m de espesor) y Code Siding (condado de Kern), donde la wollastonita se presenta en sedimentos paleozoicos metamorfizados. En Rusia se conocen yacimientos de wollastonita estratiforme, con bajo contenido en hierro, en el Escudo de Alden.

La wollastonita también se encuentra en las carbonatitas. Los yacimientos carbonatíticos se encuentran normalmente como intrusiones someras (próximas a la superficie) y asociadas con sienita nefelínica o nefelinita, en complejos de forma elíptica o circular. Los yacimientos de wollastonita en carbonatitas son de calidad más baja que los de skarn, pero son potencialmente económicos. Es poco probable que una carbonatita sea minada únicamente para explotar la wollastonita, pero puede obtenerse el mineral como subproducto.

La wollastonita en carbonatitas y rocas ultrabásicas alcalinas se origina:

- en los primeros episodios de la carbonatización, a lo largo de la periferia de los cuerpos carbonatíticos situados entre las rocas cristalinas fenetizadas y las ijolitas-melteijitas
- en la etapa final de la fenetización, mediante un aporte de CaO en el exocontacto de las ultrabásicas alcalinas (fenitas y albititas)
- por alteración hidrotermal de rocas meliliticas

Depósitos de los tres tipos aparecen en la Península de Kola (Rusia) donde se están explotando. La wollastonita se asocia con carbonatitas y/o rocas volcánicas en el Complejo Ruri (Kenya) y en Napak (Uganda), así como con bloques calizos lanzados por el volcán en Santorini (Grecia). También aparece asociada a rocas ígneas porfíricas en la República de Sudáfrica.

3.- DISTRIBUCIÓN MUNDIAL DE YACIMIENTOS

A continuación se hará una revisión completa de la totalidad de los yacimientos de wollastonita, tanto de aquellos que han tenido o tienen un interés comercial como aquellos otros que sólo son indicios mineralógicos, más o menos referenciados, o los que aún están en fase de evaluación económica o previabilidad.

El estudio se hará, en primer lugar, sobre los yacimientos de aquellos países que presentan en la actualidad producción comercial: EE.UU, China, India, Méjico y Finlandia y, posteriormente, pasaremos a aquellos países que han tenido producción en el pasado o que presentan yacimientos con viabilidad económica futura (Fig. 1).

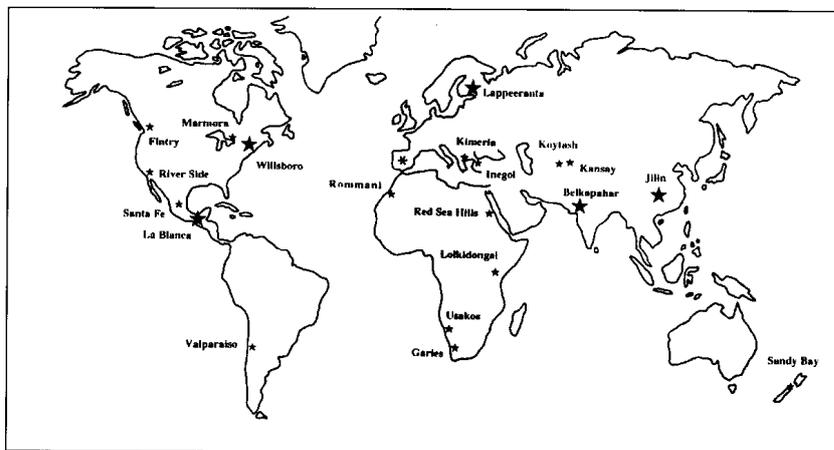


Fig. 1.- Distribución de los principales yacimientos mundiales (según Fernández Caliani, 1995)

3.1.- ESTADOS UNIDOS (EE.UU.)

La primera referencia que se tiene de un minado de wollastonita se remonta a 1933 y se trataba de una pequeña explotación en Randsburg (California) para producir fibra mineral. En las rocas sedimentarias intensamente plegadas de Code Siding, al norte de Randsburg, aparecieron capas con wollastonita-granate-diópsido y unas reservas estimadas de 12 Mt (Troxel, 1957; Troxel & Morton, 1962).

Desde su descubrimiento en la década de los 40, los yacimientos situados en un cinturón de contacto entre sedimentos metamorfizados y metasomatizados de 10 x 0.4 km, en el flanco nororiental de las Montañas Adirondack (Nueva York), han sido el centro mundial de la industria de la wollastonita.

Entre 1943 y 1982 la compañía *NYCO Minerals Inc.* explotó el yacimiento de Fox Knoll (cerca de Willsboro, condado de Essex), en la orilla occidental del Lago Champlain. La extracción inicialmente fue a cielo abierto y posteriormente por interior, pero el agotamiento de sus reservas trajo consigo el cierre de

la mina subterránea en diciembre de 1982 y el subsecuente desarrollo del yacimiento de Lewis, actualmente en producción, con unas reservas estimadas de 6 Mt (Fig. 2).

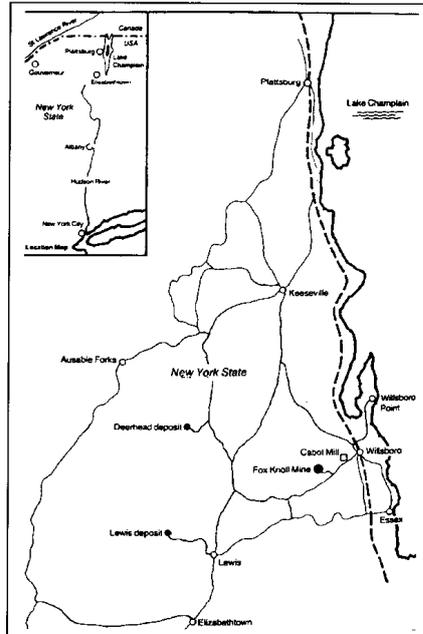


Fig. 2.- Mapa de situación de los yacimientos de wollastonita del estado de Nueva York (según Harben & Kuzvart, 1996)

El yacimiento de Lewis abarca, aproximadamente, unas 12 ha de las 105 ha de que consta la concesión. El depósito tiene una potencia de 10-20 m y 4 km de longitud y consta de un skarn de wollastonita compuesto por el 60 % de wollastonita, 30 % de granate (almandino, andradita y grosularia) y 10 % de diópsido. En 1989 se estimaron, en este yacimiento, unas reservas de 3.2 Mt, con una riqueza en wollastonita del 49 %. En el yacimiento cercano de Oak Hill, propiedad también de NYCO, existen unas reservas subterráneas aprovechables de 5.7 Mt, con un 45 % de riqueza en wollastonita.

El yacimiento de Fox Knoll se encontraba a unos 4 km al SO de la planta de procesamiento de Willsboro, mientras que el de Lewis está a unos 23 km en la misma dirección.

Los skarns de wollastonita del yacimiento de Willsboro son producto del reemplazamiento metamórfico de una intercalación calcárea, en los neises con piroxeno y granate de la Serie Grenville (Arcaico superior-Proterozoico inferior), asimilada por el plutón gabro-anortositico de Adirondack. La intrusión de gabro-anortositica transforma la caliza a mármol y allí, donde la sílice estaba presente, se forma wollastonita de grano fino. La andradita se formó en la fase postmagmática y la wollastonita se recrystalizó en un agregado fuertemente hojoso. Las reservas totales probadas son de 15 Mt.

El yacimiento de wollastonita, desarrollado por *NYCO Minerals Inc.* en las Montañas de Adirondack (condado de Essex, Nueva York), ha sido estudiado por numerosos autores. Así de Rudder (1962) señala que los cuerpos mineralizados están caracterizados por un conjunto de wollastonita-grosularita-dióxido en equilibrio simple, siendo los minerales accesorios apatito y esfena. La wollastonita aparece intercalada con niveles y lentejones de grosularita-andradita y dióxido-hedenbergita. La formación de la wollastonita depende de la composición inicial de las rocas carbonatadas de la Facies Grenville, siendo independiente del metasomatismo silíceo. El metamorfismo de contacto produce wollastonita en calizas silíceas, dióxido en dolomías silíceas y granate en calizas arcillosas. Un metasomatismo, bajo en alúmina, de las rocas sedimentarias arcillosas próximas, produjo el desarrollo de potentes skarns de grosularita bordeando los cuerpos mineralizados.

En el condado de Essex la wollastonita se asoció con rocas metasedimentarias máficas (anfíbolitas y neises piroxénicos), teniendo características mineralógicas comunes tanto de la subfacies de la hornblenda-granulita como de la subfacies del piroxeno-granulita del metamorfismo regional.

El autor concluye que la estructura neísica de estas rocas metasedimentarias, su textura granoblástica, la ausencia de halos metamórficos reconocibles y el conjunto mineral de alto grado indican que las temperaturas y presiones, relativamente altas, han permanecido durante largos periodos de tiempo. Las rocas metasedimentarias máficas presentan una paragénesis wollastonita-grosularita-dióxido que es considerada típica de la facies hornblenda-corneana o piroxeno-corneana del metamorfismo de contacto. Por lo que propone que las condiciones del metamorfismo pueden ser mejor definidas como "metamorfismo de carga térmica", definiendo este término en el contexto de: un metamorfismo térmico (o de contacto) debido a la proximidad del magma, a las grandes profundidades y a una presión uniforme muy alta.

El entorno metamórfico del yacimiento de *NYCO* debe deducirse de: las relaciones de campo, las asociaciones minerales y los datos termodinámicos y experimentales. Basándose en estos criterios, de Rudder (op. cit.) considera que los valores de presión y temperatura van a oscilar entre $6 \cdot 10^8$ y $12 \cdot 10^8$ Pa y 750 a 950 °C, lo que correspondería a profundidades de enterramiento de, aproximadamente, 30 ± 10 km.

O'Hara (1976) discrepa respecto al modelo de origen de la wollastonita de Willsboro definido por de Rudder, en el sentido que era un fenómeno asociado a un metamorfismo de contacto que se iniciaba al intruir la anortosita en las rocas de la facies granulita a una profundidad de 30 km y a una temperatura de 750 a 950 °C. O'Hara sugiere que la mineralización ocurrió después del metamorfismo regional y antes de la intrusión de la anortosita. Así la anortosita intruyó los metasedimentos en un ambiente de baja presión (a unos $2 \cdot 10^8$ Pa y 650 °C), y la acción térmica de la intrusión causó un metamorfismo de contacto en las rocas metasedimentarias con la consiguiente cristalización de la wollastonita.

Un tercer yacimiento, el de Deerhead, se encuentra a unos 8 km al NE de la mina de Lewis; contiene aproximadamente 500.000 t, con una riqueza del 25 % de wollastonita.

Todos los yacimientos de *NYCO* se han formado por metamorfismo de contacto y metasomatismo de carbonatos silíceos del Precámbrico tras la intrusión de una anortosita.

El segundo yacimiento de los EE.UU. por importancia se encuentra en Harrisville, en el área de Gouverneur (norte del estado de Nueva York), propiedad de *R.T. Vanderbilt*. La explotación se inició a finales de 1977, utilizándose conjuntamente la explotación a cielo abierto y la de interior. La wollastonita se extrae, junto con el talco, de una zona de unas 930 ha de superficie.

El depósito se formó por metamorfismo de contacto y metasomatismo que se originó, tras la intrusión de una sienita, sobre unas calizas silíceas del Precámbrico. Difiere del yacimiento de NYCO en que en Harrisville no aparece granate, pero sin embargo contiene prehenita, grafito, magnetita y diópsido.

El cuerpo mineralizado contiene un 85 % de wollastonita y está claramente diferenciado, con grandes vénulas de wollastonita separadas por zonas de ganga. Las reservas están estimadas en 900.000 t.

En California existe una serie de yacimientos de wollastonita de muy diversa índole y categoría. Así, hasta 1987, *Pfizer Inc.* produjo wollastonita al explotar selectivamente material de las Montañas Little and Big Maria y Arica, a unos 32 km al NO de Blythe (condado de Riverside). Este yacimiento constaba de niveles de wollastonita de alta calidad intercalados con diópsido y capas de caliza de poco espesor, extendiéndose unos 600 m de longitud. Parte de este material fue vendido como roca ornamental.

En el entorno del Valle de la Muerte existen diversos yacimientos, dos de ellos de gran tamaño y situados en los límites noroccidental y sudoccidental del Valle. Al NO se encuentra el yacimiento de la Montaña Hunter, cerca de Darwin, que se formó por el metamorfismo de contacto de las calizas paleozoicas. La wollastonita se encontró en un skarn alterado, a lo largo de la zona de contacto entre las calizas de Lost Burro-Tin Mountain y la cuarzo-monzonita cretácica de la Montaña Hunter, apareciendo la wollastonita asociada con contenidos menores de granate, epidota y anfíboles. El yacimiento consta de un horizonte, de más de 8 km de longitud y unos 100 m de ancho, que buza hacia el norte; siendo sus reservas superiores a los 22.5 Mt, con una riqueza en mineral de un 65 a 85 % (Clark, 1980).

Al sur de la Montaña Hunter, en la falda oriental de la Cordillera Panamint (condado de Inyo), se encuentra el yacimiento de Warm Spring Canyon que consta de un lentejón de una wollastonita prácticamente pura, con unos 250 m de largo y aproximadamente 12 m de potencia, dentro de un paquete carbonatado que buza moderadamente. Como minerales accesorios aparecen diópsido, cuarzo y calcita.

Junto a los dos yacimientos anteriores, y en su entorno, aparecen otros dos de menor entidad. También en la Cordillera Panamint, a unos 10 km al sudeste de Ubehebe Peak, aparece wollastonita de alto grado. Se presenta en rocas calco-silicatadas con diópsido, idocrasa, tremolita y materiales calcíticos como minerales asociados; siendo el material obtenido de grano fino y acicular. También se encuentra wollastonita en la Cordillera Argus, al este de Darwin (condado de Inyo).

Los últimos depósitos de wollastonita en el estado californiano se encuentran en Sheep Creek, en las Montañas Avawatz, y en las estribaciones occidentales de las Montañas Shadow, a unos 35 km al noreste de Victorville, en las Montañas de San Bernardo.

En el estado de Nevada *American Wollastonite Mining Co.* (previamente *White Plains Resources Corp.*) de Vancouver (Columbia Británica, Canadá), ha investigado un permiso de wollastonita en las concesiones Gilbert, a unos 40 km al oeste de Tonopah (condado de Esmeralda). La wollastonita se encuentra superficialmente sobre un área de unos 2.070 m de longitud y 260 m de anchura, con unas reservas probadas de alrededor de 1 Mt, un 60-70 % de wollastonita, un ratio medio del 16:1 y siendo los minerales accesorios calcita, cuarzo y diópsido. Se han tratado unas 10.000 t en la planta piloto, pudiendo



(condado de Pima); en las proximidades de Tank Pass, a unos 16 km al NO de Salomé (condado de Yuma) y en el distrito de Tombstone (condado de Cochise).

En otros estados encontramos: mármol con wollastonita en el área minera de Alder Creek, cerca de Mackay (condado de Custer, Idaho); aparece wollastonita en los xenolitos de la caliza metamórfica de los distritos de South Canyon y Organ (condado de Doña Ana, Nuevo México) y wollastonita con granate y diópsido en el área de Bingham (Utah).

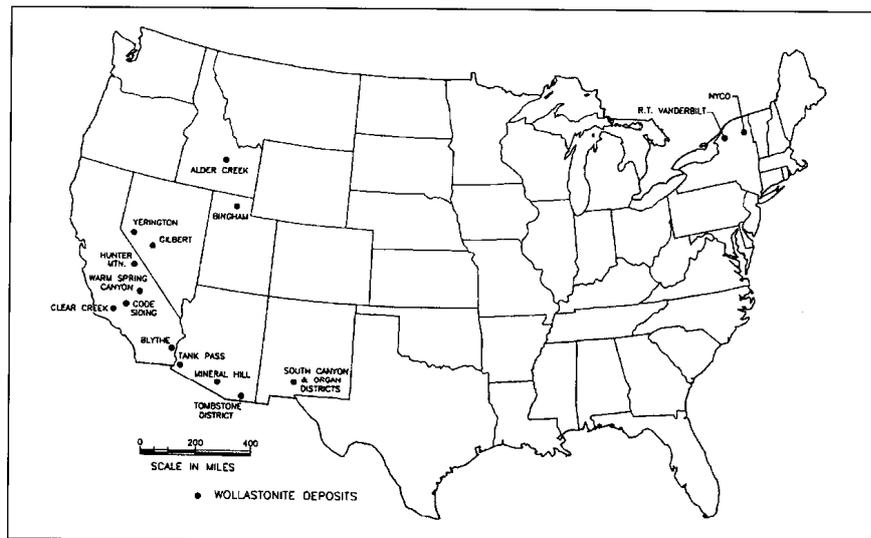


Fig. 3.- Distribución de los principales yacimientos de EE.UU (Bauer et al., 1994)

3.2.- CHINA

Los descubrimientos iniciales de wollastonita se remontan a 1975, siendo las principales provincias productoras: Jilin, Jiangxi y Qinghai que poseen el 45.6 %, 17.8 % y 14 %, respectivamente, de las reservas totales de China; pero también existen yacimientos en las provincias de Anhui, Hubei, Yunnan, Liaoning, Zhejiang, Heilong-jiang (Fountain, 1986).

La provincia de Jilin, en la parte nororiental del país (cerca de Corea del Norte), tiene tres yacimientos importantes: el área minera de las Montañas Changweizi y Caoming (condado de Panshi), las minas del Río Xilin (distrito de Yanbian) y el área minera de las colinas Dading (distrito de Siping, condado de Lishu).

En 1990 *Lishu Wollastonite Mining Corp.* tenía tres explotaciones en funcionamiento: las minas de Changweizi y de Dadingshan, cerca de Panshi (provincia de Jilin) y la de Xiaoshuanpu, cerca de Daye (provincia de Hubei).

El yacimiento de Dadingshan (constituido por los depósitos de Meiyaoshan y Tiengongshan), que se mina a cielo abierto, consta de varias zonas mineralizadas en mármol y contiene un 60-90 % de wollastonita asociada con calcita, agregados silíceos y, en menor proporción, granate y diópsido.

La estimación de las reservas geológicas de wollastonita en China, dada la complejidad del país, es un dato que arroja cifras muy variables. Mientras que Fattah (1994) señala unas reservas probadas de 98 Mt en 1992, Bauer et al. (1994) ya asignaban 100 Mt, únicamente, para el yacimiento de Yengchong (provincia de Yunnan), descubierto en 1989. Zhang (1996) las sitúa por encima de 160 Mt, con un total de recursos de unos 250 Mt y asegura que China posee el mayor número de reservas de wollastonita del mundo, seguida de EE.UU., India, Finlandia y Méjico.

Los yacimientos de wollastonita en China aparecen asociados a procesos de metamorfismo de contacto, skarns y metamorfismo regional, como en la mayoría de los depósitos del mundo.

- Los yacimientos de metamorfismo de contacto están distribuidos en la zona de contacto entre calizas ricas en sílice y rocas intrusivas, correspondientes al Paleozoico. Muchos de ellos actúan como depósitos tipo "strata-bound", presentando el yacimiento una composición sencilla. Estos depósitos representan el 81.6 % de las reservas probadas del país.
- Los yacimientos de skarn se dan en las zonas de contacto entre un cuerpo intrusivo medianamente ácido y calizas silíceas. La composición del yacimiento es compleja y suelen dar depósitos de pequeño tamaño. Representan el 13.9 % del total de las reservas de China.
- Los yacimientos de metamorfismo regional se constituyeron en el Precámbrico y en el Paleozoico. La composición es sencilla y dan lugar a yacimientos de tamaño muy variable. Sólo representan el 2.7 % del total de reservas.
- Finalmente hay que recordar que también existen depósitos de wollastonita asociados a yacimientos de Pb-Zn.

Se estima que existen unas 250 minas por el país. Sólo seis de estas minas son estatales y el resto son explotadas por colectivos de las localidades respectivas.

El mayor productor de wollastonita de China, *Lishu Wollastonite Mining Corp.*, ha anunciado el desarrollo de una nueva mina, la mina de Leija. Este yacimiento está localizado al SE del de Teigongshan, a unos 22 km de la actual planta de *Lishu*.

Se trata de un depósito somero, extrayendo el mineral de 8 venas distintas, con una corrida de 50 a 350 m de longitud y una potencia que oscila entre los 8-20 m. Las reservas probadas son de 1.5 Mt y las inferidas de 5 Mt (Anónimo, 1999).

3.3.- INDIA

En India existen afloramientos de wollastonita en los estados de Rajasthan, Madhya Pradesh, Tamil Nadu, Gujarat y Madrás. El principal productor es *Wolkem Pvt. Ltd.* que en 1968 desarrolló el yacimiento de Belkappahar, cerca del pueblo de Khila (en la división de Jodhpur, estado de Rajasthan), localizado en unos terrenos prácticamente inaccesibles, la cadena montañosa de Aravali.

Se trata de un área interior remota, aproximadamente a unos 800 km al norte de Bombay, en un abrupto terreno montañoso cubierto por un denso bosque. Cuando se descubrió el yacimiento no existían

infraestructuras en la zona. Se tardaban varias horas, a pie o en caballería, en alcanzar el emplazamiento y además la presencia de osos, panteras y zorros no animaban mucho a pernoctar, incluso, en campamentos protegidos. Inicialmente, los trabajos de limpieza y prospección duraban unas 2-3 horas al día y se necesitaban desplazamientos diarios.

El yacimiento de Belkappahar consta de tres tramos de wollastonita, intercaladas con piroxenitas y neises granatíferos, que han reemplazado la caliza. Estos tramos varían entre los 250 y 600 m de longitud, de 20 a 300 m de anchura y alcanzan profundidades de 100 a 315 m. En 1975 las reservas probadas eran aproximadamente de 50 Mt, con unas reservas probables estimadas de 200 Mt.

3.4.- FINLANDIA

Finlandia es el único país de Europa que suministra en la actualidad wollastonita de alto grado mediante la mina Ihalainen, localizada a 3 km al sur de Lappeenranta (Keeling, 1963), en la parte sudoriental del país (muy cerca de la frontera con Rusia.), propiedad de *Partek Industrial Minerals* (Fig. 4).

Este yacimiento, que tiene una dirección N-S y buza unos 60-70°E, ocupa la parte central de un cuerpo elíptico de calizas del Arcaico y está rodeado por el Granito Rapakivi, de edad más moderna, cubriendo una zona de afloramiento de unos 10.350 km², y que a su vez es cortado por diques verticales de anfibolitas con dirección NO y por unas pegmatitas, aún más recientes, que buzan suavemente hacia el NE.

Las dimensiones del yacimiento varían según los diferentes autores. Bauer et al. (1994) le asignan 3 km de largo por 1 km de ancho, con capas delgadas de rocas cuarzo-feldespáticas (leptitas) intercaladas con la caliza, la cual ha sido intruida por dos series de diques. La zona con wollastonita ocupa un área de unos 650 m de longitud y 50 m de anchura, siendo la potencia del depósito de unos 50 m. Mientras, Harben & Kuzvart (1996) consideran que la wollastonita aparece en una zona de unos 6 km de largo y 400 de espesor, coincidiendo con el centro del yacimiento de caliza.

Intercaladas con la wollastonita aparecen vénulas y filoncillos de calcita, dolomita, diópsido, leptita, cuarzo y, localmente, grafito (en contraste con el yacimiento de Lewis de *NYCO*, el granate está completamente ausente). La wollastonita contiene valores medios próximos al 20 % (aunque en ciertas áreas se enriquece y llega a alcanzar el 60 %), con tamaños de partícula que varían de 0.5 x 0.1 mm a 0.5 x 0.2 mm. Las reservas del yacimiento son de 4 Mt (Power, op. cit.).

Se acepta, generalmente, que la wollastonita se formó en las calizas a causa del metamorfismo de contacto originado por el Granito Rapakivi. El emplazamiento del granito parece haber sido suave y sometido a unas relativas bajas presiones y temperaturas. Mientras, el contacto caliza-granito es neto y concordante con el buzamiento y el de los diques es claramente recto y vertical.

La caliza del yacimiento de Lappeenranta se explotó a principios de siglo para la extracción de cal, como materia prima para la fabricación del cemento, constatándose la instalación de una cementera en 1938 y una planta de fibra mineral en 1952, no siendo hasta 1957 cuando empezó a explotarse la wollastonita. La wollastonita, minada junto con la calcita a cielo abierto, es considerada como secundaria para la compañía, ya que el principal interés de la empresa está en los varios millones de toneladas anuales que explota de cal, caliza y calcita (Fattah, op. cit.).

Además, la empresa ha arrendado un yacimiento descubierto en 1986 en Savitapale, a unos 30 km de Lappeenranta. Aunque todavía tendrá que explorarse definitivamente, las investigaciones iniciadas por

Partek en 1995 han estimado inicialmente unas reservas de unos 20 Mt, con una riqueza de 25 al 30 % de wollastonita.

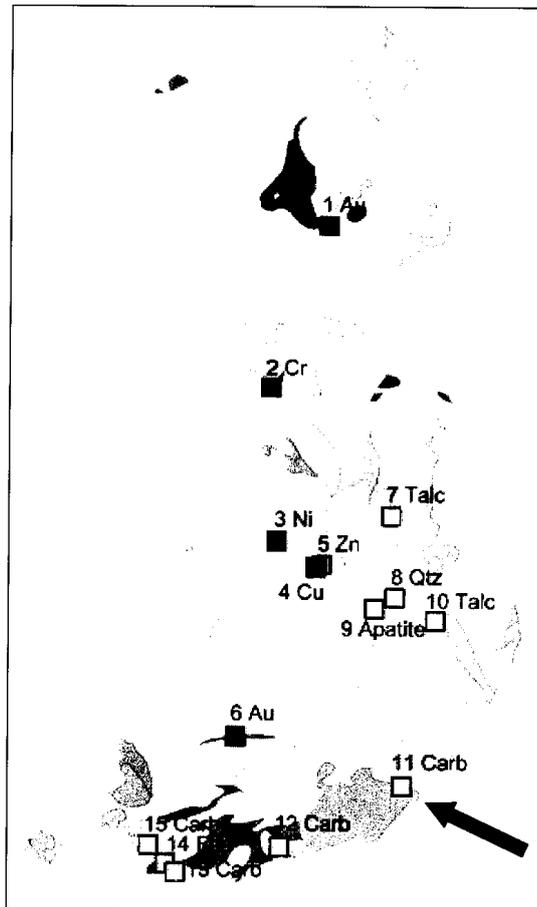


Fig. 4.- Mapa de las principales minas activas de Finlandia, con la ubicación de la Mina Ihalainen
Metálicos: 1. Pahtavaara: Au (1996) ; 2. Kemi: Cr (1969); 3. Hitura: Ni, Cu (1970) ; 4. Pyhäsalmi: Cu, Zn, S (1962); 5. Mullikkoräme: Zn, Cu (1996); 6. Orivesi: Au (1994).
No Metálicos: 7. Lahnaslampi: talco, Ni (1969); 8. Kinahmi: cuarzo (1910); 9. Siilinjärvi: apatito, caliza, mica (1979); 10. Horsmanaho: talco, Ni (1980); 11. Ihalainen: caliza, wollastonita (1910); 12. Sipoo: caliza, dolomita (1939); 13. Förby: caliza (1917); 14. Kemiö: feldespató, cuarzo (1966); 15. Parainen: caliza (1898)

Nota: La fecha entre paréntesis corresponde al inicio de las operaciones extractivas

3.5.- MÉJICO

La wollastonita ha sido explotada en Méjico desde inicio de los años 60, utilizándose bastante tiempo como roca ornamental. La producción mejicana ha sido, desde sus inicios, muy variable.

Desde principios de los 60 hasta 1989, fecha en que cesó la actividad extractiva, *Wollastonita de México, S.A.* explotó una mina a cielo abierto, situada entre los pueblos de El Saucito y Noria del Cerro (distrito de La Blanca, estado de Zacatecas). El yacimiento se compone de niveles tabulares de wollastonita, con una potencia de unos 2.5 m, dentro de unas calizas plegadas del Cretácico próximas a intrusiones graníticas. Son comunes las bandas de mármol gris con wollastonita, conteniendo niveles de granates, pero también existen bandas de wollastonita blanca extremadamente pura. Se estiman unas reservas de 40 Mt de mineral de buena calidad (Andrews, 1970).

General de Minerales, S.A., propiedad del *Grupo Lamosa*, produce wollastonita en dos minas a cielo abierto ubicadas en Santa Fe y Pánfilo Natura, a 50 o 60 km de Guadalupe (estado de Zacatecas). La wollastonita aparece en niveles delgados que buzan hasta un máximo de 50° y está asociada con calcita, cuarzo, granate y diópsido.

La Mina Santa Fe, aproximadamente a unos 40 km al sur de Pichucalco (norte del estado de Chiapas), es propiedad de la *Compañía Minera Cerralvo* y ha producido algo de wollastonita como subproducto del tratamiento del cobre. El yacimiento es una masa elíptica, en forma de domo, de un skarn de wollastonita, con unos 400 m de largo, 120 m de ancho y 100 m de espesor.

Minera NYCO, S.A. de C.V., subsidiaria de *NYCO*, adquirió en 1994 el yacimiento de alta calidad y alto grado de Pilares, al NO de Hermosillo, con 465 ha de derechos mineros y 777 ha de terreno. El yacimiento posee unas reservas superiores a los 26.8 Mt de mineral (Anónimo, 1994a).

NYCO, sin embargo, no es el único interesado en la wollastonita mejicana. Junto a la nueva propiedad adquirida por la compañía norteamericana, se encuentra el yacimiento² de San Héctor (Bauer et al., 1994; Harben & Kuzvart, 1996) o de San Martín (Anónimo, 1994a; Fattah, 1994), propiedad de la productora de oro *Cominco Resources International Ltd.* de Vancouver (Canadá) a través de su filial mejicana *Cía. Minera Constelación, S.A. de C.V.* El yacimiento está situado en una serie paleozoica de mármoles calcíticos y cuarcitas que buzan hacia el N, próximos a unos granitos cretácicos. Se trata de capas que pueden seguirse durante kilómetros, con potencias de varias decenas de metros y un contenido > 70 % de wollastonita, que aparecen intercaladas con niveles de mármol calcítico, con un 40 % o menos de wollastonita. El cuarzo, la calcita, el diópsido y el granate son los únicos minerales asociados. La mayoría del trabajo se ha centrado en el cuerpo meridional del yacimiento, obteniéndose unas reservas de unas 700.000 t.

Aunque inicialmente se desarrollaron algunas pruebas de beneficio mediante separación manual, obteniéndose material con un 90 % de wollastonita, *Cominco* decidió inicialmente mantener el proyecto en reserva hasta que las condiciones económicas fuesen más favorables para, finalmente, abandonarlo debido a los costos que supondría la construcción de la necesaria planta de tratamiento (Fattah, op. cit.).

Finalmente, Lefond (1983) y Power (op. cit.) citan una serie de yacimientos e indicios en diferentes localidades. Así en Xalostoc (Sierra Tlayacac, estado de Morelos) aparecen yacimientos de caliza ornamental con wollastonita, en las calizas metamórficas próximas al contacto con el granito. El material pule bien, con la wollastonita de color blanco contrastando con el rosa del granate y el amarillo de la idocrasa.

²- Según los diferentes autores recibe una denominación u otra (N.A.).

En grandes extensiones de la zona de Naica (Chihuahua) aparece wollastonita en forma de pequeños filoncillos, dentro de un skarn con un mineral poco cristalino y un color que varía de blanco a rosa pálido. También, en el área de Sierra Maestra (distrito de Llanos, norte de Puebla), aflora una caliza metamórfica con wollastonita.

3.6.- ÁFRICA

3.6.1.- KENYA

Hasta principios de los años 80 Kenya explotaba el yacimiento de Lolkidongai, en el corazón de la tierra Masai, a unos 80 km al sur de Nairobi. Estos depósitos, inicialmente descubiertos a mediados de los 60, afloraban en tres colinas, presentando una longitud máxima del afloramiento de unos 500 m y una anchura media de 35 m (Mason, 1966).

El material, un mármol rico en wollastonita, formaba parte de una serie de niveles de caliza cristalina asociada con rocas migmatíticas y pelíticas del Precámbrico. La roca contenía venas de wollastonita masiva intercalada con granate, diópsido y cuarzo.

3.6.2.- NAMIBIA

Namibia tiene yacimientos importantes de wollastonita cerca de Usakos, a 32 km al sur de Karibib, en el extenso cinturón de mármol wollastonítico de Damarland. Los mármoles y los esquistos micáceos formados por metamorfismo en la Orogenia Damara, fueron intruidos por un granito, el cual produjo wollastonita en los contactos (Andrews, op. cit.). Las reservas del yacimiento fueron evaluadas en unas 40.000 t.

3.6.3.- REPÚBLICA DE SUDÁFRICA

Power (op. cit.) cita en Garies, en el área de Springbok (Namacualandia), depósitos de wollastonita asociados a un cinturón de metamorfitas calcáreas, rodeado por granitos y neises. Este yacimiento podría contener más del 50 % de wollastonita, con diópsido y granate como accesorios.

Más tarde, en 1991, *Pella Refractory Ores* inició una explotación en Modderfontein (18 km al NE de Garies). El yacimiento contiene más de 2 Mt, con una riqueza en mineral del 50 al 60 %.

3.6.4.- MARRUECOS

En Azegour, al SO de Marrakech, en un área comprendida entre las estribaciones septentrionales del Atlas y la costa oriental se encuentra el yacimiento de Rommani, propiedad de *Morocco Minerals Co.* Las capas de wollastonita tienen unos 9 m de espesor y se calcula que las reservas probadas son del orden de las 400.000 t, con un 34 % wollastonita y un ratio superior a 20:1 (Power, 1986; Fattah, 1994).

3.6.5.- SUDÁN

Existen diversos yacimientos en Sudán, aunque ninguno ha entrado en producción. En 1983 fracasó el "joint venture" entre la compañía finlandesa *Oy Partek* y la estatal *Sudanese Mining Corp.* para desarrollar y explotar un yacimiento de 500.000 t de wollastonita en Dirbat, a unos 150 km al noroeste de Port Sudan. La investigación geológica detallada se realizó en colaboración con el Geological and Mineral Resources Dpt. de Sudán, quien localizó un yacimiento con un contenido en wollastonita del 71 %. Tanto los mercados interiores como los de exportación fueron revisados, sin embargo el proyecto fue abandonado debido a dificultades políticas y a problemas por el alto coste del embarque.

También se reconocen grandes depósitos de wollastonita en el NE de las Red Sea Hills, aproximadamente a unos 110 km de Port Sudan. El mineral aparece en masas lenticulares, con más de 30 m de largo y con idocrasa, granate y diópsido como minerales accesorios (Power, 1986).

3.7.- AMÉRICA

3.7.1.- CANADÁ

Hay un considerable potencial para la producción de wollastonita en Canadá, particularmente en Ontario, Quebec y la Columbia Británica. En Ontario y Quebec las mejores áreas madre para localizar wollastonita son aquellas donde afloran mármoles y rocas calco-silicatadas de la provincia estructural de Grenville, cerca de cuerpos intrusivos (principalmente anortositas y rocas relacionadas). Parte del Escudo Canadiense se deformó durante la Orogenia Grenville (970 a 1.160 Ma), constituyendo un cinturón de 400 km de anchura de rocas ígneas y metamórficas del Precámbrico que se extiende unos 1.800 km por la orilla septentrional del Río San Lorenzo.

3.7.1.1.- Ontario

El yacimiento de wollastonita/calcita de Deloro, cerca de Marmora (190 km al este de Toronto), ha sido explorado y evaluado por un "joint venture" entre *Cominco Ltd.* y *Platinova Resources Ltd.* Está compuesto por una mineralización de skarn, próxima a una intrusión granítica, en un mármol silicificado dentro de una secuencia de metasedimentos carbonatados, anfibolitas y metagrauwacas del Precámbrico inferior. Las reservas fueron estimadas inicialmente en 2 Mt, con una riqueza del 40 % de wollastonita. Trabajos geológicos posteriores han identificado cuatro pequeños horizontes que oscilan entre el 28 y el 38 % de wollastonita, totalizando casi unos 2 Mt de reservas probadas.

Un segundo yacimiento fue localizado en el Monte Grove, en Olden Township (este de Ontario). Investigado en 1990 por *Ram Petroleum's Ltd. Drillig* (de London, Ontario) mediante sondeos, se definió una zona de 35 m de ancho y 75 m de profundidad que contenía 2.7 Mt de reservas seguras, con una riqueza del 32 % de wollastonita, 63 % de calcita y 5 % de diópsido. La wollastonita presenta un alto ratio que oscila entre 17:1 y 24:1.

La compañía que está ahora trabajando en el proyecto, *Wollasco Minerals Inc.* (subsidiaria de *Ram Petroleum's Ltd.*) ha continuado el trabajo donde *Ram* lo dejó. *Wollasco* cree en la calidad del material del yacimiento y lo considera adecuado como para competir satisfactoriamente con los actuales productores de material de alta calidad.

El yacimiento de Seeley's Bay, que originalmente se llamó Mallens Farm y posteriormente St. Lawrence (cerca de Kingston, SE de Ontario), ha sido explorado y evaluado por *U.S. Borax Inc.*, quien ha identificado más de 9 Mt con una riqueza del 41.3 % de wollastonita y otras 3 Mt con un 30 % de mineral. El yacimiento presenta como minerales asociados: > 30 % diópsido, 5-20 % feldespatos y 2-10 % cuarzo.

El depósito se formó en la última fase de la Orogenia Grenville, mediante un metasomatismo hidrotermal de contacto originado entre un skarn calco-silicatado y un plutón gabroide, de edad proterozoica. Las capas del skarn, que buzcan variablemente y están fuertemente plegadas, se intercalan con un skarn de diópsido y cuarzo-feldespatos formando un sinclinorio que cabecea hacia el SO.

Durante las etapas más bajas del metamorfismo, facies de las granulitas, se produce una transferencia masiva de fluidos a través de capas permeables y a favor de la fracturación que se origina a causa del suave ascenso del plutón. Los fluidos se concentraron regionalmente a causa de la presión de

confinamiento de los materiales superiores, preferentemente niveles de cuarcitas impermeables y rocas cuarcíticas y cuarzo-feldespáticas intercaladas (Crouse & Akerley, 1994).

Cerca del Lago Prairie, a 48 km al NE de Terrace Bay, se ha explorado recientemente otro depósito. Se trata de un complejo carbonatítico con un núcleo rico en nefelina. Los sondeos han definido un gran yacimiento, conteniendo decenas de millones de toneladas con un contenido del 25 % de wollastonita.

3.7.1.2.- Quebec

Sobre el límite provincial de Quebec se han identificado varios depósitos de interés comercial. Así el yacimiento de Lac St. Jean, que ha sido investigado por *Orleans Resources Inc.* de Montreal, se localiza en la zona suoriental del enorme complejo anortosítico del mismo nombre. Aquí, la anortosita es cortada por una serie de intrusiones graníticas, charnokíticas, mangeríticas y sieníticas y contiene, localmente, gran cantidad de restos metasedimentarios fallados de la parte superior del complejo. Los metasedimentos son, principalmente, mármoles cuarcíticos, dolomíticos o calcíticos y rocas calco-silicatadas. El área principal se encuentra en la zona de Lac aux Grandes Pointes, donde ha sido identificado un skarn de diópsido y wollastonita con más de 150 m de anchura y 5-6 km de longitud (Hébert & Jacob, 1995). Se ha informado que el yacimiento contiene unos 5 Mt de reservas probadas (10.4 Mt probables y 12.1 Mt posibles) con una riqueza del 37 % de wollastonita y un ratio de 20:1. A finales de 1997 la compañía anunció que había completado la construcción de su nueva planta de procesamiento de wollastonita en el yacimiento y que éste contenía alrededor de 25 Mt de reservas (Bolger, 1998).

El área de Montreal-Gatineau contiene unos 100 Mt, principalmente en la parte central del área, en una gran zona de neises migmatíticos y graníticos que han sido intruidos por anortositas y que están relacionados con rocas del complejo anortosítico de Morin (Simandl, 1990).

3.7.1.3.- Columbia Británica

En este territorio Lefond (1983) señala en Fintry, a 16 km al norte de Kelowna, capas de caliza fuertemente basculadas que contienen lentejones de wollastonita-calcita con una riqueza del 30 %. El depósito aparece en una aureola de contacto entre la intrusión granítica y los sedimentos paleozoicos. Más tarde, Fischl (1991) cita nueve depósitos de wollastonita sin identificarlos plenamente.

En las proximidades del Lago Wormy se han encontrado dos depósitos diferentes, ambos investigados por *Tri-Sil Minerals Inc.* Uno de ellos se encuentra a unos 45 km al NO de Vancouver, apareciendo el skarn mineralizado sobre una pendiente muy abrupta y aflorando intermitentemente a lo largo de unos 600 m. Sus reservas estimadas son de 50 Mt.

El otro depósito, denominado Mineral Hill, se haya en las proximidades de Sechelt (2.5 km al SE del Lago Wormy y a 1.5 km del mar) y se emplaza sobre el mismo skarn que el del anterior yacimiento. Este depósito presenta unas reservas de 290.000 t de wollastonita, con un 42 % de riqueza y 70.000 t de granate.

Whitegold Resource Corp. ha investigado un yacimiento en el área del río Iskut (NO de la Columbia Británica) y ha finalizado el correspondiente estudio de viabilidad, confirmando unas reservas minerales probadas para 20 años con una producción de 50.000 t/año. Este yacimiento se encuentra 32 km aguas arriba de la confluencia del río Iskut con el río Stikine (Fig. 5), en el Complejo Ígneo de la Montaña Zippa del Triásico superior (Coulson et al., 1999).

El Complejo está compuesto por varias intrusiones: el plutón de la Montaña Zippa, el del Monte Raven y el de la Montaña Seraphim, fuertemente asociados espacialmente pero con composiciones químicas diferentes. El plutón de la Montaña Zippa, que es de forma elíptica (3.5 x 5 km), es fuertemente subsaturado en SiO₂ y está compuesto de un núcleo sienítico con fases de borde de mela-sienita y

piroxenita. El plutón del Monte Raven está constituido por una diorita hornblédica equigranular, mientras que el de la Montaña Seraphim lo está por un granito biotítico con hornblenda equigranular. El Complejo intruye metasedimentos paleozoicos del Conjunto Stikine y vulcanitas triásicas del Grupo Stuhini (Lueck & Russell, 1994). El metamorfismo regional en las proximidades de la Montaña Zippa alcanza la facies de los esquistos verdes (Anderson, 1989).



Fig. 5.- Mapa de situación regional del área del Río Iskut (según Jaworski, 1996)

Aunque los tres plutones del Complejo Ígneo de la Montaña Zippa intruyen calizas, los skarns de wollastonita únicamente aparecen asociados a los márgenes del plutón de la Montaña Zippa. Hasta la fecha sólo han sido identificados cinco skarns con wollastonita; dos de los cuales, los depósitos Cliff y Glacier, fueron cartografiados e investigados durante el verano de 1995 (Fig. 6).

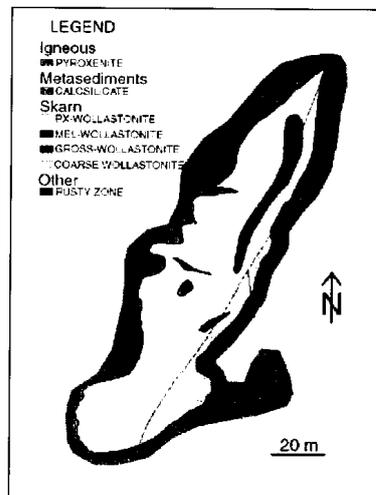


Fig. 6.- Mapa geológico del skarn wollastonítico de Cliff, asociado al Complejo ígneo de la Montaña Zippa (según Jaworski, op. cit.)

Observaciones petrológicas y de campo sugieren que los skarn wollastoníticos se formaron por la acción de fluidos de infiltración sobre xenolitos carbonatados en los bordes del plutón de la Montaña Zippa. La estrecha asociación espacial entre el skarn y el conjunto de minerales ígneos sugieren que los fluidos de infiltración procedían del plutón (Jaworski, op. cit.).

La principal evidencia del origen de la wollastonita mediante procesos de infiltración, la aporta la excepcional pureza del mineral. La mayoría del skarn presenta contenidos en volumen de wollastonita superiores al 70 % y sin la presencia de calcita y cuarzo.

La pureza de la wollastonita y la ausencia generalizada de calcita en la Montaña Zippa indican que la formación del skarn de wollastonita tuvo lugar, por lo menos en parte, por la reacción de la calcita con sílice introducida metasomáticamente.

La secuencia de minerales del skarn, ordenados de más antiguos a más modernos, sería:

wollastonita → diópsido → augita → titanita → melanita → granate (grosularia)

3.7.1.4.- Territorio del Yukón

Archer, Cathro & Associates han descubierto un yacimiento en el Territorio del Yukón, a unos 450 km de la ciudad portuaria de Haines (Alaska, EE.UU). Las muestras de superficie contienen más de un 85 % de wollastonita.

3.7.2.- CHILE

En 1994 (Fattah, op. cit.) existía un único productor chileno, *Estudios y Proyectos Mineros Ltda. (EPROM)*, el cual producía wollastonita de alta calidad para uso cerámico en un yacimiento localizado a unos 60 km al NO de Santiago y a 50 km al E del puerto de Valparaíso (Figs. 7 y 8).

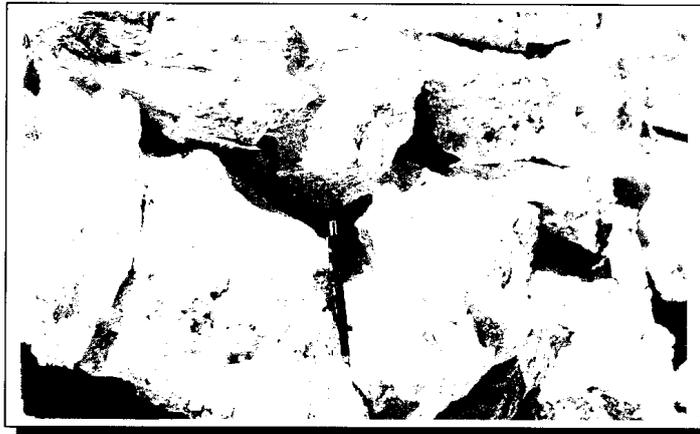


Fig. 7.- Detalle de la wollastonita de la mina de EPROM



Fig. 8.- Vista de uno de los afloramientos de la mina de *EPR*OM

3.7.3.- CUBA

Existen referencias de un yacimiento en las proximidades de Arimao (Cienfuegos), propiedad de *Geominera S.A.*, con unos 4.7 Mt de reservas. El yacimiento tiene 45 % SiO_2 y 41 % CaO (Fattah, op. cit.).

3.8.- ASIA

Aunque en el apartado correspondiente a producción se cita a Corea del Norte y Japón con producción propia, no ha sido posible localizar ninguna referencia respecto a las características geológicas y genéticas de dichos yacimientos.

3.8.1.- PAKISTÁN

En 1991 *Black Mountain (Pvt.) Ltd.* pretendió obtener 32.000 t/año de wollastonita molida y en pellets de una mina cercana a los pueblos de Lashker y Qallah (distrito de Swat). El yacimiento parecía disponer de unos 5 Mt, aunque no ha podido demostrarse que tal producción llegase a alcanzarse (Fattah, op. cit.).

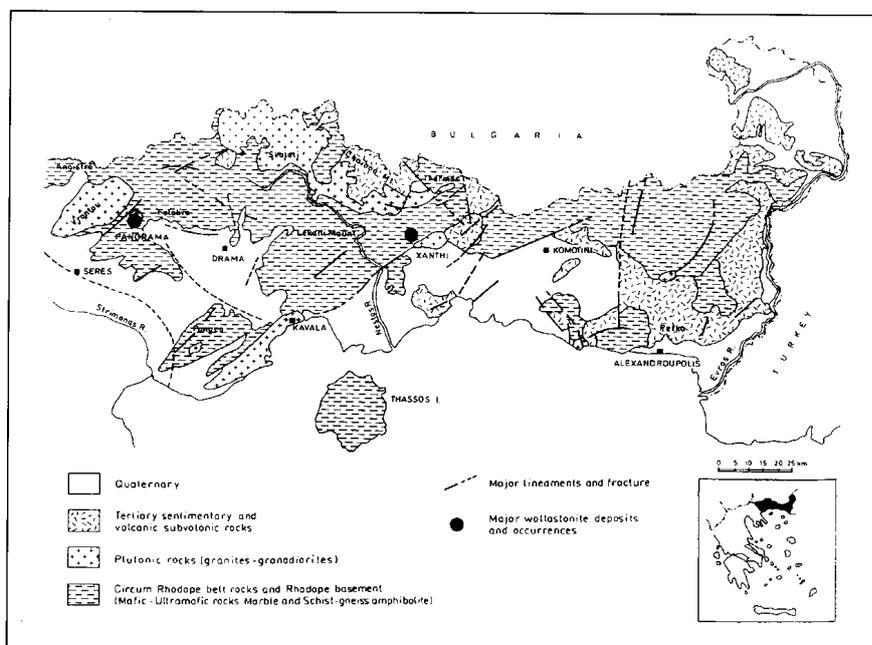
3.9.- EUROPA

Además de los países que se van a describir a continuación, existen yacimientos de wollastonita, de diferente magnitud, en España, Francia, Italia, Suiza, Lituania, Alemania, etc.; aunque, a excepción del caso español, no se tienen referencias concretas sobre los mismos.

3.9.1.- GRECIA

3.9.1.1.- Xhanti

Los afloramientos de wollastonita de Kimmeria y Kalamou se localizan en la zona de Xhanti (Fig. 9).



La estructura del skarn de Kimmeria se caracteriza por dos fallas principales, orientadas E-O y N-S respectivamente, que separan tres bloques, estando en una posición estructural más alta los del sur que

los del norte. El granito está fuertemente erosionado en el bloque meridional, la erosión está justo a ras de la superficie en el bloque intermedio y no aflora el granito en el bloque septentrional.

Se identificaron dos tipos de distribución de wollastonita. Una litología de skarn (prácticamente mármol puro) establecida en los yacimientos de Kalamou y Kimmeria, con dos paquetes de alternancias de anfibolitas-neises-mármol, de espesor individual moderado (> 30 m), separadas por una serie néisica potente (800 m). A escala local aparecen capas aisladas de poco espesor (10-30 m), intensamente wollastonitizadas e intercaladas entre una serie anfibolítica bien desarrollada. El miembro geométricamente más alto del grupo Kimmeria, un potente mármol (200 m), es sin embargo prácticamente estéril. En el área de Kalamou el mármol está wollastonitizado en el contacto con el granito, a lo largo de más de 100 m. Hacia el granito la wollastonita queda limitada por un skarn granatífero, como se observa en el área de Panorama.

La wollastonita en Kimmeria está especialmente desarrollada en el bloque septentrional y sólo en algunas capas de mármol de espesor limitado, lo que demuestra que el fluido fue canalizado por algunas capas y no por otras (a una distancia inferior a los 300 m del granito) y que fue necesaria la presencia de rocas silicatadas en las proximidades, como fuente de sílice para el reemplazamiento de la calcita por la wollastonita. En muchos casos, tales afloramientos pueden describirse como “pipas” más que como capas.

Con la subvención de un Proyecto de Minerales Industriales de la UE, la compañía *Metallic Industrial Minerals Mevior, S.A.*, subsidiaria del *National Investment Bank for Industrial Development (NIBID)*, exploró y llevó a cabo los estudios de procesamiento del yacimiento de wollastonita de Kimmeria (Power, 1986). Los principales niveles del depósito tienen unos 8 m de potencia y contienen un 50-80 % de wollastonita, formada en un ambiente metasomático. Otros minerales de skarn presentes son: grosularia (granate), diópsido y hematites micáceo. Las reservas del yacimiento varían entre 300.000 t (Bauer et al., 1994) y 700.000 t (Fattah, 1994), presentando ratios comprendidos entre 15:1-20:1.

3.9.1.2.- Panorama

El entorno geológico del afloramiento de Panorama es una pequeña intrusión granítica que cubre un área de unos 6 km². El granito está en posición apical, intruye los miembros inferiores de la Unidad carbonatada de Falakron y es un satélite del gran Macizo de Vrodou (33 Ma). Mineralógicamente, las rocas graníticas están compuestas de cuarzo, feldespato-K ($Or_{75}-O_{80}$), plagioclasa, biotita y anfibolita, como componentes principales y de apatito, ilmenita y zircón como accesorios (Gracia et al., op. cit.). Generalmente las manifestaciones de alteración consisten en la cloritización de las biotitas, la seritización de las plagioclasas y algún desarrollo de moscovitas.

El mármol de Panorama es de color blanco a gris pálido y está compuesto, principalmente, de: calcita, con $< 1\%$ de flogopita diseminada y trazas de forsterita, clinohumita, condrodita y feldespato-K. Se ha encontrado dolomita y cristales delgados de espinela en una capa de espesor decimétrico.

Los skarns se desarrollan en diferentes lugares a lo largo del contacto mármol-granito. Muestran dos características: el desarrollo inusual de endoskarns (la transformación metasomática del granito, que se observa durante unos pocos metros en el contacto con el mármol) y la presencia de wollastonita tanto en los endoskarns (reemplazando al cuarzo original) y, más significativamente, en los exoskarns (reemplazando a la calcita original).

Así, la wollastonita se desarrolla en el skarn, principalmente en el mármol (exoskarn) en el contacto con el granito (endoskarn). La presencia de wollastonita con interés económico se restringe a un episodio concreto dentro de una serie de sucesivas fases hidrotermales que siguen al emplazamiento del granito. El desarrollo tardío de granate (en la forma de grandes cuerpos granatíferos masivos, de composición

El yacimiento se encuentra en la Secuencia Supracrustal de Bergslagen (SSB), una potente serie félsica (más de 10.000 m) compuesta predominantemente por vulcanitas supracrustales, cuya edad es de 1.800-1.900 Ma y que es el resultado del desarrollo polifásico subacuático de una zona de rift continental (Baker et al., 1988). Los protolitos de la roca wollastonítica son lentejones calcáreos/dolomíticos, intercalados con vulcanoclastitas foliadas y metamorizadas por un metamorfismo de bajo grado, de la fase inicial del rift, cerca de la zona de contacto con el granito Flipstad, de edad 1.740 Ma (Van Meerten, 1988).

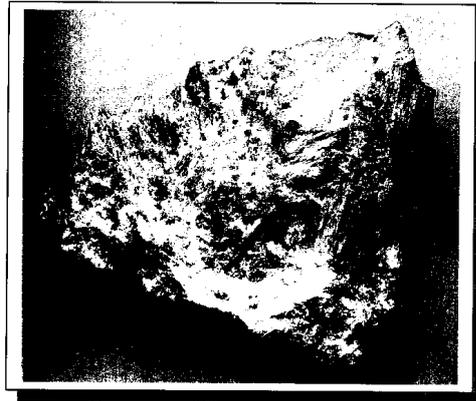


Fig. 10.- Wollastonita de la zona minera de Svartsång (Flipstad, Suecia). Muestra de 10 cm de tamaño

En el área de Hällefors-Hjulsjö-Nora se reconocen tres paquetes de la SSB. Hacia el techo se presenta una transición de unidades originadas durante un vulcanismo explosivo, con potentes depósitos ignimbríticos y de bombas, a unidades correspondientes a un régimen menos explosivo, caracterizadas por menos piroclastos y más tufitas. Continúan unos 2.000 m de metasedimentos, incluyendo grauwacas, pizarras y depósitos de "mass flow", que se depositaron en grabens y que constituyen el techo de la secuencia. Los conglomerados polimícticos, presentes en las unidades superiores, marcan una discontinuidad local relacionada con el desarrollo de la cuenca de rift.

Los afloramientos de wollastonita del distrito minero de Bergslagen, están localizados en niveles de mármoles, intercalados en potentes secuencias de sedimentos vulcanoclastíticos del Proterozoico medio. El desarrollo de la wollastonita es el producto de:

- (1).- metamorfismo de contacto durante la intrusión de los granitos antiguos (1.740 Ma)
- (2).- metasomatismo de contacto mediante fluidos hipotermales, ricos en F-Bi-W-Mo

Puesto que los niveles de mármol están también mineralizados por óxidos de Fe-Mn y sulfuros metálicos pueden ser localizados mediante métodos geofísicos, incluso bajo considerables espesores de morrenas. Estos depósitos glaciares, con espesores mínimos de 10 m, son los principales culpables de que no se hubiese reconocido antes el potencial económico de la wollastonita.

Las principales litologías asociadas con el skarn son mármoles deformados y mármoles serpentiniticos, con disseminaciones de sulfuros de Zn-Pb-Ag.

Hay evidencias, a escala de meso y microfábrica, que señalan una etapa sin-tectónica o tardía para los skarns de Silverön.

El desarrollo del skarn tuvo lugar en cuatro fases principales:

- (1).- etapa del clinopiroxeno
- (2).- etapa de la wollastonita
- (3).- etapa del granate (principalmente hidrogrosularia)
- (4).- etapa hidrotermal tardía, con deposición de sulfuros de Zn-Pb(Ag)

En el área de Silverön, el cuerpo skarnoide con interés (wollastonita, clinopiroxeno, granate) cubre una extensión de unos 200 x 500 m en dirección NNE, con posible continuidad hacia el SSO. En base a la distribución de la wollastonita, grado de concentración y paragénesis mineral, se definieron ocho zonas agrupadas en torno a tres alineamientos de dirección NNE, occidental, central y oriental (Fig. 11).

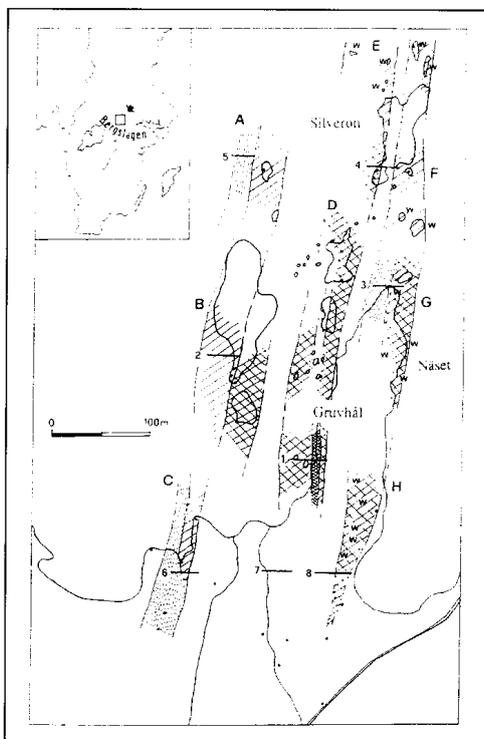


Fig. 11.- Yacimiento de wollastonita de Silverön. Distribución de las diferentes zonas (A-H) según una estructura preferencial de dirección NNE (según Gracia et al., op. cit.)
Punteado: $\leq 10\%$ de wollastonita; Líneas inclinadas: 10-30 %; Trama: 30-50 %; Trama densa: 60 %; Números: sondeos mecánicos; Puntos: situación de muestras; w: afloramientos

Se definieron, a unos 30 m de profundidad, unas reservas probables de wollastonita de 670.000 t, mientras que las reservas globales (probables+posibles) eran del orden de 1-1.5 Mt.

3.9.3.3.- Hulta

La prospección de Hulta-Gruvor está localizada a 7.5 km al NO de la ciudad de Nora. Se observan tres niveles de mármol, de subhorizontales a ligeramente inclinados, dentro de una potente secuencia de metavulcanitas félsicas que están cortadas por un dique dolerítico, casi vertical y de dirección E-O, en el límite meridional de la concesión.

El mármol wollastonítico es un tramo que está horizontal o buzando débilmente y que puede ser seguido, unos 600 m desde el oeste hasta el este, mediante testigos de sondeos y alguna pequeña mina abandonada de hierro, donde queda reconocido mediante cuatro calicatas. El mármol wollastonítico fue cortado por los sondeos a profundidades que oscilan entre los 4 m y los 70 m, con un espesor máximo de 7 m de mineralización wollastonítica ininterrumpida en un testigo de sondeo.

Las paragénesis presentes en el entorno son:

- granate - piroxeno - escapolita - skarn scheelítico
- granate - biotita - esquistos con magnetita
- mármol - granate - felsitas con vesubianita

Grandes bloques, con un 90 % de wollastonita de alta calidad, se encontraron en la parte más oriental de los afloramientos de mármol wollastonítico.

Se identificaron dos zonas subparalelas, intercaladas entre las metavulcanitas félsicas, el skarn y los óxidos de hierro. El origen de la wollastonita está relacionado más con un metasomatismo hidrotermal que con un metamorfismo de contacto, como generalmente se asume. La deposición de una formación de hierro sin-volcánico y un horizonte de carbonato-chert crearon el precursor químico para la formación de la wollastonita. Los procesos hidrotermales y metasomáticos, posiblemente relacionados con la presencia de una gran intrusión granítica profunda, fueron los responsables del desarrollo de la mineralización de scheelita-fluorita en Hulta y en otra serie de lugares, mientras que los niveles de mármol-chert proporcionan el ambiente químico para la interacción con el fluido hidrotermal. Se considera, pues, que la wollastonita se ha desarrollado en los niveles de mármol-chert de Hulta como el resto de los minerales de skarn.

La mineralización está tapada por más de 5 m de morrenas. Definiéndose un yacimiento de 2.5 Mt, con un contenido medio del 30 %, aunque localmente se alcanzan contenidos superiores al 80 %.

3.9.4.- SERBIA

En las proximidades del Monte Kopaonik, a unos 200 km al sur de Belgrado (Serbia), existe un yacimiento que contiene un 60-70 % de wollastonita, con cuarzo y calcita asociados. Las investigaciones geológicas han sido ejecutadas por una organización de investigación gubernamental de Zagreb.

3.9.5.- REPÚBLICA DE CHEQUIA

En la República de Chequia se encuentra el yacimiento de Kladská-Lazy (cerca de Kynzvar) que se ubica dentro de unas filitas con sericita y grafito, cerca de su contacto con un granito del plutón de Karlovy Vary (Harben & Kuzvar, 1996).

3.9.6.- POLONIA

Se localizan rocas calco-silicatadas que contienen wollastonita-diópsido-granate, en las estribaciones septentrionales de los Montes Sudetes, cerca de Strzelin (Power, op. cit.).

3.10.- ex-URSS / RUSIA

Existen muchos depósitos de wollastonita en el territorio de la antigua URSS, algunos de los cuales son potencialmente explotables y otros sólo tienen interés mineralógico. Se distribuyen sobre amplias áreas dispersas y por ello, a la hora de su estudio, los vamos a agrupar por su ubicación geográfica:

3.10.1.- ASIA CENTRAL

Se conocen más de 50 yacimientos de wollastonita, describiéndose a continuación los más importantes.

3.10.1.1.- Uzbekistán

El yacimiento de Koytash está situado en las Montañas Nuratau, a unos 72 km al norte de Samarcanda y al SE del Mar de Aral (cerca de la frontera con Afganistán). La wollastonita se encuentra en unas corneanas calco-silicatadas, en el contacto entre unas calizas arcillosas y una intrusión granodiorítica. Las corneanas afloran por espacio de 1 km y contienen un 30-40 % de wollastonita, 30 % de calcita y pequeñas cantidades de feldespato, granate, dióxido, cuarzo, idocrasa y piroxeno (Power, 1986; Bauer et al., 1994).

A unos 113 km al sur de Samarcanda se encuentra el yacimiento de Lyangar, donde la wollastonita se encuentra en unas corneanas calco-silicatadas (skarnoide). Aunque no se dispone de detalles respecto al espesor o la extensión del mismo, se sabe que se trata de un yacimiento grande.

El yacimiento de Nakpai, entre las ciudades de Almalyk y Tashkent, presenta unos 400 m de longitud y casi 61 m de espesor. Las reservas se estiman, aproximadamente, en 1.5 Mt.

Otros depósitos, pero asociados con skarns, son los de: Ingichke (en las Montañas Zirabulau), Mynbulak (en las Montañas Karzhantau, al NE de Tashkent) y Taskazgan (cerca de Bukharsk).

3.10.1.2.- Tadjikistán

La wollastonita es común en el norte de Tadjikistán, y allí se ha obtenido algo de producción del yacimiento de Kansay³, a unos 29 km al norte de Leninabad (Bauer et al., 1994). La wollastonita es de color blanco a rosáceo, de grano fino, fibrosa a radiada y asociada a niveles de wollastonita-granate-piroxeno en cornubianitas calco-silicatadas (Power, 1986).

Este yacimiento es similar, en génesis y mineralogía, al de Lyangar descrito previamente.

3.10.1.3.- Kazajistán

Se dispone de muy poca información sobre los 30 yacimientos conocidos de la región, con la excepción del yacimiento de Bosaginski; no obstante se sabe que todos ellos son de gran tamaño y están asociados a calcita y cuarzo. El depósito de Bosaginski se encuentra a unos 270 km al sur de Karaganda y posee 450 m de longitud y más de 70 m de anchura, alcanzando unos 270 m de profundidad (Santini, 1989).

En el área de los Montes Urales, sólo se ha encontrado wollastonita en las zonas calco-silicatadas de los Esquistos de Bashmakov.

3.10.2.- ASIA ORIENTAL

La wollastonita se asocia con skarns cerca de Emel'dzhak, sin embargo el espesor de los mismos es de sólo 1 a 3 cm, aunque los contenidos en wollastonita oscilan entre el 70 % y el 97 %.

³- Este yacimiento es citado por Harben & Kuzvart (1996) como Pihshidi, aunque por una errónea traducción de la ciudad de Leninabad, lo ubican al norte de San Petersburgo (Leningrad) (N.A.).

Fattah (1994) cita, en la República de Altai, un yacimiento de 1.2 Mt y el 64.7 % de wollastonita propiedad de la compañía moscovita *Bia*.

3.10.3.- RUSIA NOROCCIDENTAL

Se conocen más de una docena de afloramientos de wollastonita, pero la mayoría sólo presentan interés mineralógico.

3.10.4.- ÁREA DE SAN PETERSBURGO

En Kalkitekhda, cerca de San Petersburgo, existe un yacimiento de caliza que contiene más del 50 % de wollastonita. Su calidad es baja y no ha sido explotado, por lo que se ha pensado en su utilización como roca ornamental.

Otra zona susceptible de investigación es la de Pilkom-selga, donde en el contacto entre las rocas del Complejo de Karelia y las rocas externas de las intrusiones ultrabásicas-alcalinas pueden existir posibilidades de aparición de wollastonita.

3.10.5.- RUSIA SUDOCCIDENTAL

En las áreas del Bajo Don y del Norte del Cáucaso se han localizado 19 afloramientos de wollastonita, pero la mayoría sólo presentan interés mineralógico.

3.10.5.1.- Kabardinos-Balkaira

Un skarn con wollastonita se encuentra en Tyryauz o Tyrnyauz, ciudad en el norte del Cáucaso y próxima al Río Baksan, a unos 38 km al SO de Nal'chik. La wollastonita es de pobre calidad y no necesita más exploración.

3.11.- OCEANÍA

3.11.1.- NUEVA ZELANDA

Hasta 1994 existió una modesta explotación en Takaka Hill (noroeste de Nelson), propiedad de *Mintech NZ Ltd*. Las reservas probables estaban alrededor de las 50.000 t, con wollastonita asociada a calcita, cuarzo y diópsido, aunque éste en pequeñas cantidades (Power, 1986).

3.11.2.- AUSTRALIA

Aunque Australia no tiene producción de wollastonita, se conocen una serie de depósitos en Queensland, Nueva Gales del Sur, Australia del Sur y Tasmania. La compañía *Adelaide Wallaroo Fertilizer Pty. Ltd*. ha investigado un yacimiento en Ethudna (NE de Australia del Sur), identificando unos recursos de 1 Mt con un 40 % de wollastonita de promedio.

4.- YACIMIENTOS ESPAÑOLES

La wollastonita en España es un mineral cuya investigación e intentos de aprovechamiento se inician en la década de los 80, aunque sus primeras referencias mineralógicas son muy anteriores.

La primera cita que se encuentra en la bibliografía nacional es de Calderón (1910), quien ubica indicios del mineral en la zona de Nuria (Pirineo gerundense) y en Mérida (Badajoz), presentando un análisis del mismo.

Un lustro más tarde Sos Baynat (1962) describe el indicio de Mérida, y lo desglosa en dos afloramientos: la Sierra de Araya y el Cerro Carija. Posteriormente Liso y Guixà (1980) realizan un estudio geológico y mineralógico del yacimiento extremeño, estimando un tonelaje aproximado de 25.000 t de mineral.

Galán Huertos y Mirete Mayo (1979) citan la presencia de wollastonita en Gualba (Barcelona), Nuria (Gerona), Mérida (Badajoz), Colmenar Viejo (Madrid), y en diversos puntos de los terrenos metamórficos de la provincia de Madrid (C^a. de Guadalix, Somosiera y Navacerrada).

Tras llevar a cabo el IGME (1979) una investigación sobre las posibilidades de roca ornamental en el norte de la provincia de Huelva, el Ministerio de Industria y Energía (DGM-ENADIMSA, 1988 y 1989; ENADIMSA, 1984 y 1990) inició una investigación de wollastonita en las proximidades de Aroche (Huelva). Las reservas evaluadas de este yacimiento varían en función de los distintos autores, estimándose estas entre 1.5 Mt (Griffo Navarro y Rincón Mayoral, 1990) y 1.8 Mt (ITGE, 1990 y 1991a).

En los últimos años se han registrado nuevos trabajos en el yacimiento de Mérida que, merced a las aportaciones de Fernández Caliani (1991 y 1995), Galán et al. (1993) y Fernández Caliani et al. (1994; 1996a y 1996b), ha visto aumentadas sus reservas.

Mientras, en la zona pirenaica, se citan diversos skarns wollastoníticos en la comarca de la Cerdanya (Soler y Delgado, 1991; Soler et al., 1991).

No obstante son abundantes las zonas que, aunque de momento sólo a nivel mineralógico, presentan wollastonita en la Península Ibérica, Tal es el caso de los indicios de Panticosa (Santana et al., 1992) y Pontios de los Baños (Mirete Mayo, 1999⁴), en la provincia de Huesca; Fermoselle (Franco et al., 1994), en Zamora; San Salvador de Cantamuda (Martín Izard et al., 1986), en Palencia; Vegas de Matute (Mirete Mayo, 1999⁵), en Segovia; Lugar Nuevo de Fenollet (Casanova y Ochando, 1998), en Valencia; diversos indicios en el Sistema Central o, finalmente, el de Peraleda de San Román (Junta de Extremadura, 1994), en Cáceres.

4.1.- MÉRIDA (BADAJOZ)

La primera referencia que se encuentra en la bibliografía nacional acerca de la wollastonita es de Calderón (1910) quien, en su trabajo "Los minerales de España", cita:

"En la caliza silúrica de la provincia de Badajoz, cerca de Mérida, se encuentra un filón de diorita con un relleno de agujas blancas, de brillo sedoso, formando un agregado fibroso-radiado"

⁴- Comunicación personal de Mirete Mayo (N.A.)

⁵- Comunicación personal de Mirete Mayo (N.A.)

Igualmente, presenta el siguiente análisis químico de la referida muestra:

SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	CO ₂	SO ₃	H ₂ O
48.36	46.41	1.30	1.56	1.00	0.56	1.11

En un trabajo sobre la mineralogía de Extremadura, Sos Baynat (1962) describe el yacimiento de Mérida desglosándolo en dos afloramientos, uno situado en la Sierrecilla de Araya y el otro en el Cerro Carija.

Sitúa el afloramiento de la Sierrecilla de Araya en el contacto entre unas calizas marmóreas devónicas, con dirección N140°, y un batolito granítico (Fig. 12).

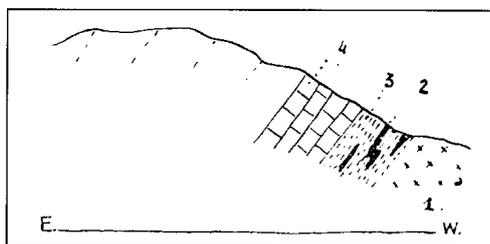


Fig. 12 - Yacimiento de wollastonita de la Sierrecilla de Araya (según Sos Baynat, 1962)
 1: granito; 2: wollastonita intercalada en la caliza; 3: calizas marmóreas negras y grises; 4: calizas ferruginosas, espatizadas.

Respecto al afloramiento del Cerro Carija, que se encuentra junto al Embalse de Proserpina, el mineral aparece formando bolsadas en la ladera N y NE y en la misma situación estratigráfica que en la S^e. de Araya. El autor considera que se trata de un mineral de metamorfismo, que se forma a partir de los 380 °C y que aparece acompañado de: granate, epidota, diópsido y vesubianita.

Liso y Guixà (1980) realizan un estudio geológico y mineralógico del indicio extremeño. Lo sitúan a unos 4 km al NO de Mérida, sobre una calizas del Cámbrico inferior y con un fácil acceso a través de la C^a. Mérida-Embalse de Proserpina y de la C^a. Mérida-Montijo.

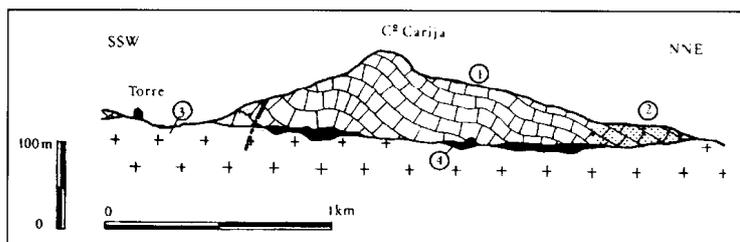


Fig. 13.- Corte esquemático del Cerro Carija (según Liso y Guixà, op. cit.)
 1: calizas; 2: calizas con wollastonita; 3: granitos y granodioritas; 4: diorita

La masa calcárea se ubica sobre granitos, granodioritas, dioritas y anfíbolitas. Hacia la parte más septentrional del cerro, en las proximidades del contacto con el granito, las calizas aparecen con wollastonita y algunas silicificaciones que van aumentando a medida que nos alejamos del referido contacto y a la vez que disminuye la presencia de wollastonita (Fig. 13).

El mineral aparece en masas blancas y gris-blanquecinas, de aspecto fibroso y formas arriñonadas, sublenticulares o aplanadas y con una composición química definida (Tabla 3)

TABLA 3. ANÁLISIS TIPO DE LA WOLLASTONITA DE MÉRIDA

ELEMENTO	(%)
SiO ₂	50.94
CaO	41.10
MgO	4.28
Al ₂ O ₃	0.31
Fe ₂ O ₃	0.38
FeO	0.13
Na ₂ O	0.54
K ₂ O	0.14
MnO	0.03
H ₂ O	0.10
PPC	2.04

Fuente: Liso y Guixà (op. cit.)

En base a la asociación mineralógica que aparece, wollastonita-diópsido-tremolita, consideran que genéticamente se trata de un yacimiento de metamorfismo de contacto, originado a través de un metasomatismo (skarn) de 400-600 °C; donde el aporte de sílice, desde el granito a las calizas, es lo suficientemente grande como para producir abundante wollastonita.

Desde el punto de vista del interés comercial del yacimiento, se calcula un volumen de calizas de unos 240.000 m³ con una riqueza del 3 % de wollastonita, lo que permite estimar unas reservas del orden de las 25.000 t de mineral (Liso y Guixà, 1980).

En los últimos años, y propiciados inicialmente por la Junta de Extremadura, se han registrado nuevos trabajos en el yacimiento de Mérida que, merced a Fernández Caliani (1991 y 1995), Galán et al. (1993) y Fernández Caliani et al. (1994; 1996a y 1996b), ha visto aumentadas sus reservas.

En las proximidades de Mérida (SO del Cerro Carija) aflora, sobre un basamento precámbrico, una serie carbonatada compuesta por calizas carbonosas con intercalaciones de niveles y nódulos de cherts en su tramo inferior y una formación predominantemente dolomítica en el superior (Fernández Caliani, 1995). En conjunto, estos materiales se encuentran entre rocas dioríticas deformadas y una intrusión granítica tardihercínica que ha desarrollado una extensa aureola de metamorfismo de contacto. Las rocas carbonatadas ocupan el núcleo de una estructura sinclinal, atribuida a la F₁ de la deformación Hercínica y afectada por varios sistemas de fracturación (Fig. 14).

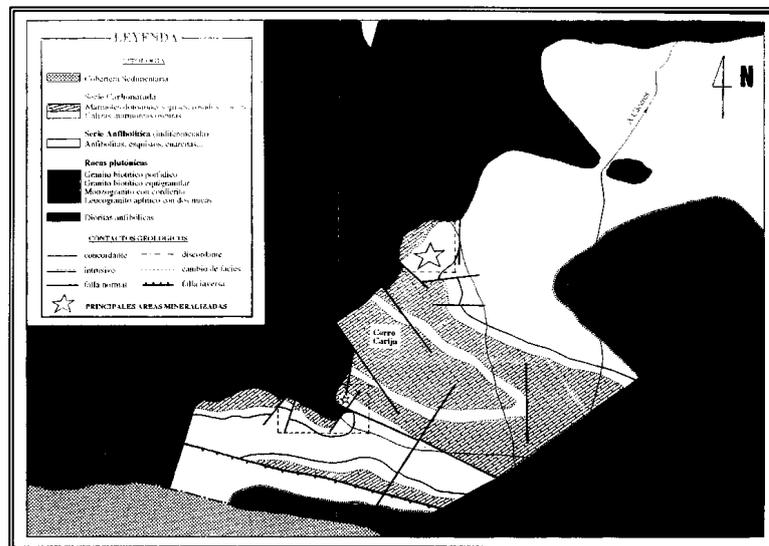


Fig. 14.- Cartografía geológica de los alrededores de Mérida (según Fernández Caliani, 1995)

La sucesión estratigráfica (Fig. 15) se inicia con 10 m de una serie anfibólica basal, de edad pre-Vendiense, intruida por ortoneises anfibólicos (dioritas deformadas). Continúa, concordantemente, con una formación calcárea en cuyos tramos superiores se implantan niveles y nódulos silíceos, y termina con una formación dolomítica. Ambas formaciones carbonatadas son de edad Cámbrico inferior.

La formación calcárea, con una potencia de 20-25 m y aspecto marmóreo, está constituida en su base por calizas carbonosas fétidas, de color negro y grano fino, que se presentan masivas o difusamente estratificadas, con algunos bancos irregulares de 0.3-1 m de potencia y, que a veces, contienen pequeños niveles de jaspe rojo y restos de pirita limonitizada.

Hacia el techo las calizas se tornan más masivas y compactas, con tonalidades grises y azuladas que en algunos puntos están intensamente atravesadas por vetas de calcita blanca, que contrasta con el fondo oscuro de las calizas, y también presentan algunos niveles más pelíticos (margosos y margocalizos) interestratificados junto, con bolsadas de rocas dolomíticas. En estos horizontes superiores, y a veces en zonas afectadas por la dolomitización, se manifiestan numerosos niveles intercalados de chert rítmicamente intercalados en las calizas, que resaltan en el terreno por su mayor resistencia a la meteorización, marcando las superficies de estratificación. El espesor de estos niveles silíceos oscila entre unos milímetros y algunos decímetros, siendo los más comunes los niveles de 2-6 cm.

Localmente la concentración de niveles silíceos puede ser elevada, entre 5 y 10 niveles por cada 10 cm de roca carbonatada. La formación dolomítica suprayacente está compuesta, fundamentalmente, por las dolomías y mármoles dolomíticos que configuran la mayor parte del cerro Carija y la vertiente norte de la Sierrecilla de Araya.

Estructuralmente, se puede reconocer una secuencia de pliegues de primer orden orientados según la dirección NO-SE. Presentando los anticlinales cierres periclinales vergentes hacia el NO, mientras que los cierres de los sinclinales lo hacen hacia el SE. En base a la orientación de las megaestructuras, y considerando la zona en conjunto, todo parece indicar que los materiales del sector fueron estructurados durante la orogenia Hercínica.

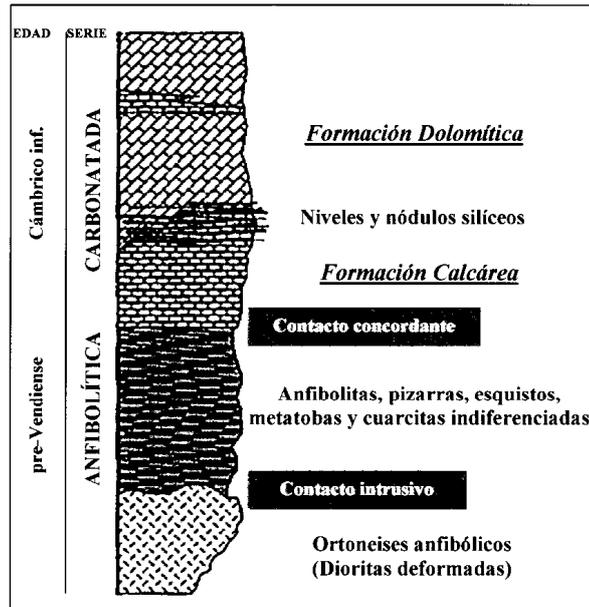


Fig. 15.- Columna estratigráfica general del área de estudio (modificado de Fernández Caliani, 1995)

Concretamente, los materiales carbonatados del cerro Carija ocupan el núcleo de una estructura sinclinal de dirección axial N130°-140° E y vergente al SO, flanqueada por los materiales precámbricos de la serie anfibolítica.

La Fig. 16 muestra un corte perpendicular a la dirección principal de las estructuras.

Desde el punto de vista genético, a la sedimentación en el Cámbrico inferior de las calizas carbonosas y algunos niveles siliciclásticos, en un ambiente de plataforma más o menos restringida, le sigue una diagénesis temprana (cementación y litificación) y una diagénesis avanzada (dolomitización) que se continúan, tras la deformación producida por la orogenia polifásica Hercínica, en la recrystalización producida por un metamorfismo de contacto y, finalmente, por la alteración superficial.

Los componentes mineralógicos que aparecen en los mármoles y rocas calcosilicatadas, como consecuencia de los procesos metamórficos de recrystalización o neoformación, son los siguientes: calcita, cuarzo, dolomita, anfíboles, piroxenos, olivinos, wollastonita y, en menores proporciones, vesuvianita,

granates, flogopita y materia carbonosa grafitizada. Asimismo, existen otros minerales genéticamente relacionados con los procesos retrógrados del metamorfismo, tales como: talco, serpentina y epidotas. Entre las fases neoformadas, además de la wollastonita, destacan los anfíboles y los piroxenos.

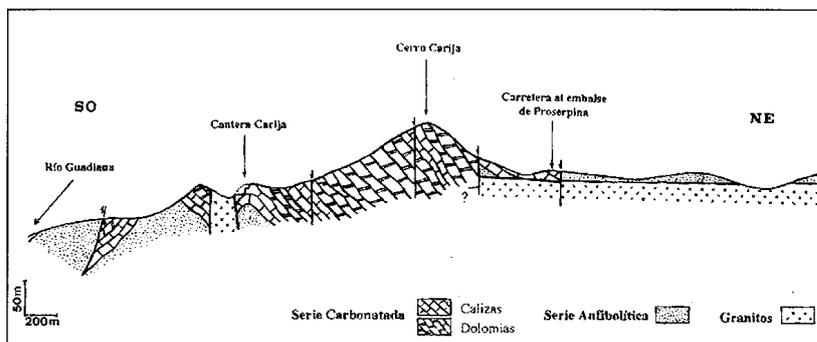


Fig. 16.- Corte geológico del cerro Carija y alrededores (según Fernández Caliani, 1995)

El metamorfismo de contacto, asociado al plutón granítico, ha desarrollado una zonación mineralógica progresiva que se pone de manifiesto en los mármoles, con el desarrollo de tres zonas metamórficas progresivas, caracterizadas por la presencia de tremolita, diópsido y wollastonita como minerales índices del grado metamórfico bajo, medio y alto, respectivamente.

Se aprecia un manifiesto control litoestratigráfico, observándose que los niveles de metachert están ribeteados por la wollastonita, lo cual sugiere un reemplazamiento preferencial de las rocas silíceas en respuesta al incremento de temperatura producido por el metamorfismo de contacto progresivo; deduciéndose que la sílice de los niveles y nódulos de metachert ha reaccionado total o parcialmente con las calizas encajantes, desarrollando mineralizaciones masivas a lo largo de los contactos mármol-metachert.

Las mineralizaciones de wollastonita están asociadas a los niveles y nódulos silíceos interestratificados en las calizas oscuras del tramo inferior. A la vista de los datos presentes parece que la sílice ha reaccionado con el mármol encajante por metamorfismo térmico, dando masas bandeadas y nodulares de wollastonita en la zona más interna de la aureola, en un depósito típico de skarn bimetasomático, formado en condiciones termobarométricas de 550-580° C y 500 bares. Se localizan dos sectores principales mineralizados, ubicados al Norte y al Sur del Cerro Carija, con 10 y 5 ha mineralizadas respectivamente.

El espesor de las mineralizaciones de wollastonita disminuye progresivamente con la distancia al contacto intrusivo, de modo que a unos 15 m del granito los niveles wollastoníticos tienen en general espesores milimétricos, ya que, aunque se aprecia una cierta correlación entre el espesor de las mineralizaciones y la distancia al granito, existen muchas excepciones (Fig. 17).

También se ha detectado un control estructural importante. Los niveles silíceos que han desarrollado wollastonita están interestratificados en los mármoles y, por lo tanto, han sufrido una intensa deformación previa a la mineralización; por lo que los niveles wollastoníticos se disponen a favor de las direcciones de estratificación y el mineral se concentra, preferentemente, en las zonas de charnela de los pliegues.

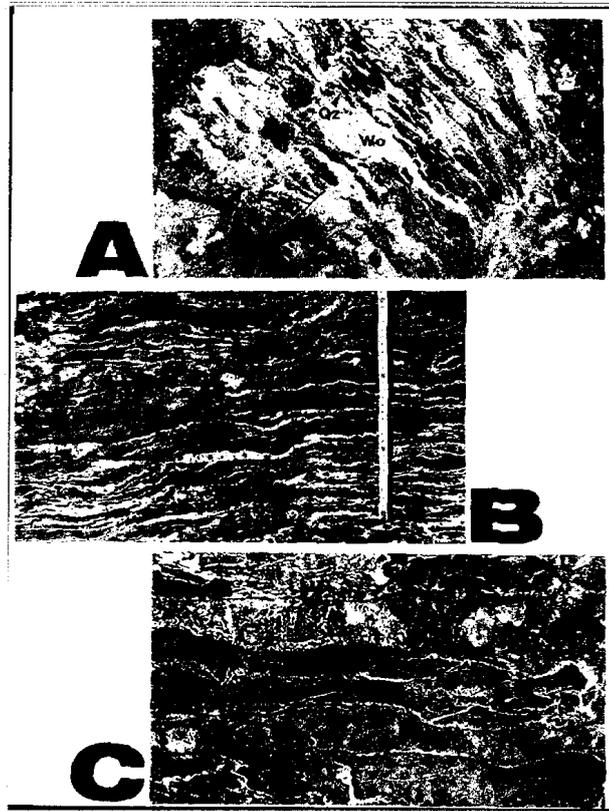


Fig. 17.- Relación entre el desarrollo de las mineralizaciones de wollastonita y la distancia del afloramiento al contacto intrusivo. A: 4 m; B: 10 m; C: 12 m (según Fernández Caliani, 1995)

Este control estructural se reconoce tanto a escala meso como a escala macroscópica. Así, las mineralizaciones con mayor contenido en wollastonita se localizan en los cierres periclinales de los antifórmas adyacentes al plutón granítico.

Las mineralizaciones presentan, en general, morfologías bandeadas y nodulares heredadas de los niveles, nódulos y "boudines" de las rocas silíceas intercaladas en los mármoles. Las masas wollastoníticas son prácticamente monominerálicas, con agregados de cristales columnares o fibrosos de wollastonita-Tc, con alguna impureza de diópsido, calcita o cuarzo, y más raramente vesubianita y granates. Quedando reflejadas, en las Figs. 18a y 18b, las características morfológicas y el aspecto de campo de los diferentes tipos de mineralizaciones existentes.

En el área de trabajo pueden diferenciarse tres tipos de litologías:

- mármoles wollastoníticos
- cuarcitas wollastoníticas
- wollastonititas (> 90 % de wollastonita)

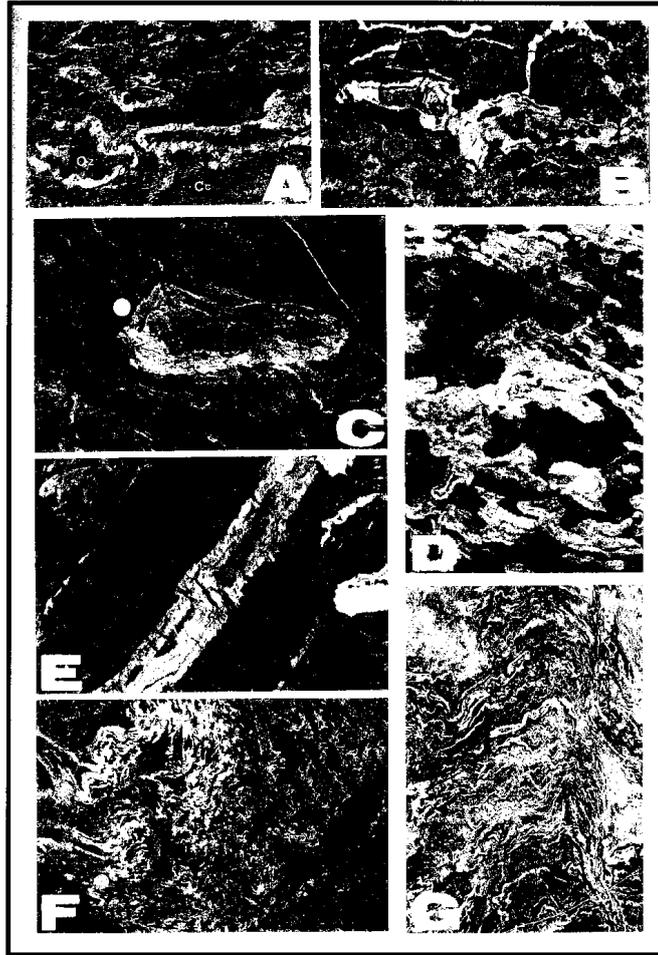


Fig. 18a.- Diversos tipos de mineralizaciones wollastoníticas (según Fernández Caliani, op. cit.)
A, B y C: nódulos y "boudines" de metachert, con bordes de reacción constituidos por wollastonita; **D:** niveles irregulares de metachert sustituidos por wollastonita granular en el núcleo y fibrosa en los bordes; **E:** banda wollastonítica con relictos de cuarzo en su interior; **F y G:** niveles cuarcíticos, intensamente replegados y transformados en wollastonita.

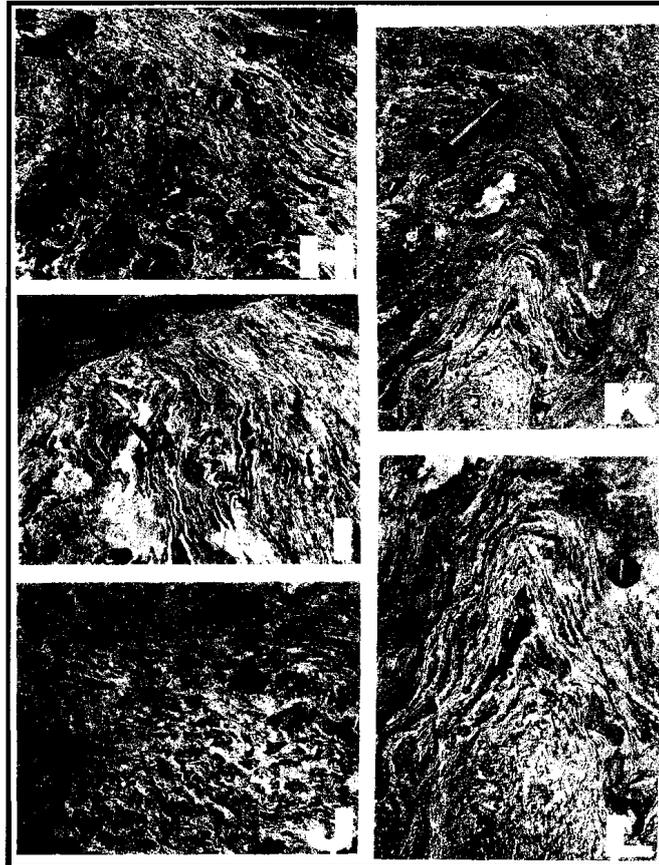


Fig. 18b.- Diversos tipos de mineralizaciones wollastoníticas (continuación) (según Fernández Caliani, op. cit.)

H, I y J: aspecto general de las mineralizaciones de wollastonita; **K:** pliegues con charnela engrosada y flancos aboudinados, en niveles de metachert reemplazados por wollastonita; **L:** detalle de la zona de charnela de los pliegues de la foto anterior.

La mayor parte de los cristales analizados son de fibra corta o media, teniendo el 80 % de ellos un ratio < 10:1. Dominan los cristales con una relación de 5:1-10:1, mientras que los de elevada acicularidad ($\geq 16:1$) sólo representan el 8 % del total. Con el proceso de molienda de larga duración parece mantenerse

la abundante presencia de cristales de baja acicularidad ($\leq 10:1$), aunque al cabo del tiempo (decenas de minutos) se origina una disminución del grado de acicularidad (Fig. 19).

Las características industriales de la wollastonita de Mérida son bastante aceptables. Su composición es $> 96\%$ de $\text{CaO}+\text{SiO}_2$, la pureza del mineral es elevada, presenta una PPC $< 2\%$ y un contenido de óxido de hierro sobre mineral bruto sin purificar $< 0.5\%$. El porcentaje de blancura se ha establecido en torno al $63-83\%$, siendo $> 85\%$ la que se precisa comercialmente, pudiendo disminuir su blancura la presencia de pequeñas inclusiones de grafito. Los valores de pH (9.3-10.3), dureza Rockwell (83.5) y densidad (2.91 g/cm^3) son normales para este producto.

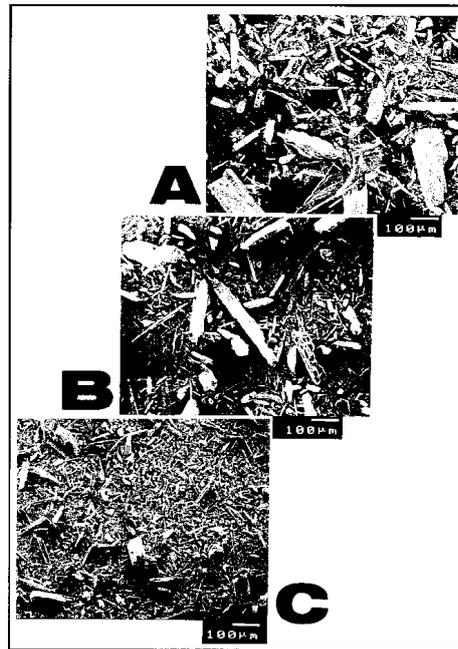


Fig. 19.- Aspecto al SEM de los cristales de wollastonita tras ser sometidos a una molienda de duración variable. Los tiempos de molturación fueron: (A) 1 minuto, (B) 15 minutos y (C) 30 minutos (según Fernández Caliani, 1995)

Se consideran sin apenas interés económico: las mineralizaciones de wollastonita diseminadas en las calizas, con agregados fibrosos de tamaño microscópico; los estratos de calizas wollastonitizadas de la ladera Sur de la Sierrecilla de Araya (1.5 m de potencia y 3 m de continuidad lateral), con masas fibroso-radiadas y longitud de las fibras $< 0.5 \text{ cm}$; aquellas mineralizaciones relacionadas con diques aplíticos y pegmatíticos que rellenan pequeñas fracturas paralelas a los diques, con wollastonita en pequeños haces de fibras orientadas y diseminadas en el mármol o en agregados de cristales asociados a minerales de skarn; en rocas brechoideas, en una zona de intensa silicificación, etc.

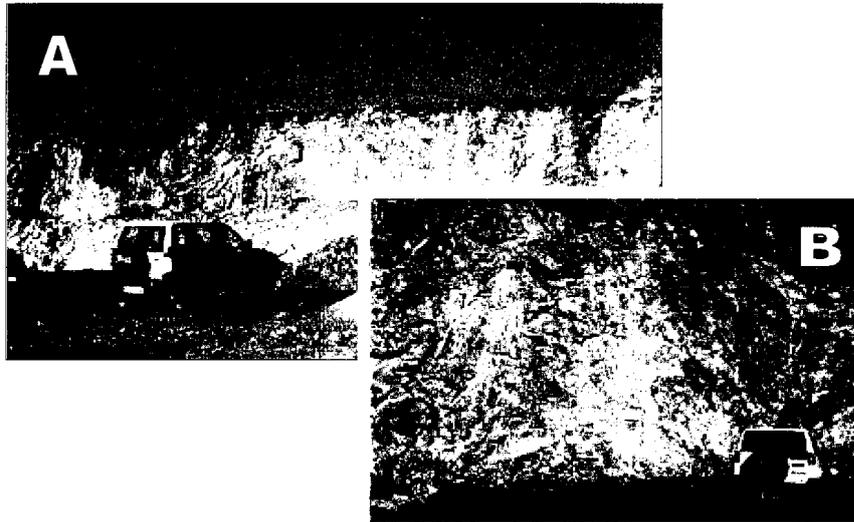


Fig. 20.- Vista de del estado actual de los diferentes frentes de arranque de la Cantera de Carija, S.A.
A: frente superior; B: frente inferior (Foto J.M. Baltuille)

En algunos puntos del sector norte del Cerro Carija existen enriquecimientos, con más de 1 m de potencia, que pueden superar el 50 % de contenido en wollastonita masiva. La wollastonita se presenta en agregados de cristales fibrosos o prismáticos alargados, entrelazados u orientados perpendicularmente al borde de los niveles y nódulos de metachert, aunque a veces las masas de wollastonita presentan un aspecto más granular; también son comunes los haces de fibras radiados en forma de abanico, englobados dentro del mármol y sin relación aparente con antiguos niveles silíceos, como sucede en la wollastonita que rellena las microfracturas de los mármoles.

A falta de una campaña de sondeos adecuada, se pueden inferir unos recursos superiores a las 25.000 t estimadas por Liso y Guixà (1980). De acuerdo con la pureza y el grado de acicularidad de los cristales (5:1-10:1) el mineral se podría utilizar en la industria cerámica y como agente de carga simple, ya que su blancura, pH, densidad y dureza son similares a las que presentan las wollastonitas comerciales, aunque el bajo grado de acicularidad restringe su utilización (Fernández Caliani, 1995).

4.2.- AROCHE (HUELVA)

El IGME (1979), a través de la *Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S.A. (ENADIMSA)*, investigó las posibilidades de los mármoles de la Sierra de Aroche para su aplicación como roca ornamental. En ese trabajo se cita la presencia de wollastonita dentro de dichos materiales calcáreos.

El área de trabajo estaba parcialmente ocupada por el P.I. "MEDIANA. 1ª FRACCIÓN", nº 10.059, que estaba caducado pero pendiente de concurso. El 23 de agosto de 1980 el BOE publicó la caducidad del permiso citado anteriormente y la *Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S.A. (ENADIMSA)* presentó, al correspondiente concurso, la solicitud de un nuevo dominio minero denominado P.I. "AROCHE" con 35 cuadrículas mineras. El otorgamiento definitivo llega el 23 de agosto de 1981, correspondiéndole el nº 14.403 del registro minero de Huelva.

Entre 1979 y 1982 se delimitaron una serie de áreas de interés entre las que destacó la zona de Aroche, solicitándose el indicado permiso de investigación. En él, entre 1983 y 1985, se efectuó una investigación para mármol que puso de manifiesto la presencia de importantes recursos de esta sustancia en orden a su aprovechamiento como roca ornamental. En el desarrollo de esta investigación se detectó la presencia de interesantes indicios de wollastonita asociados a los niveles marmóreos presentes; lo que, desde 1987, impulsó la investigación de este nuevo recurso en el marco del Programa de Investigación Sistemática de Recursos Minerales (SISTEMINER) de la Dirección General de Minas.

El 23 de junio de 1984 se solicita una prórroga de tres años que es concedida el 13 de agosto de ese mismo año. ENADIMSA (1984) investiga los mármoles de Aroche y ya realiza un estudio de laboratorio sobre una serie de muestras que presentan wollastonita.

Con fecha 4 de junio de 1986 se pide la extensión del permiso a sustancias de la sección C de la Ley de Minas y, concretamente, a wollastonita. El 7 de agosto de 1987 se solicita una segunda prórroga para continuar la investigación emprendida.

Por otra parte ENADIMSA solicita, para recursos de la Sección C, el otorgamiento del P.I. "NINES" de 299 cuadrículas mineras, siéndole concedida la adjudicación el 29 de octubre de 1987 con el nº 14.536, quedando pendiente la demarcación y el otorgamiento definitivo.

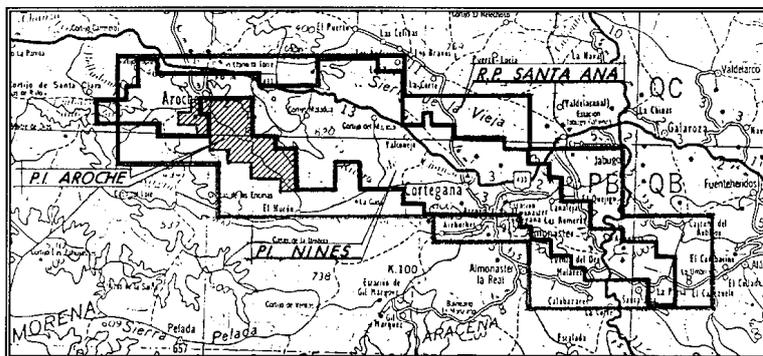


Fig. 21.- Representación del Dominio Minero de ENADIMSA

Paralelamente, con fecha 30 de julio de 1987, ENADIMSA solicitó la inscripción de propuesta de Reserva Provisional a favor del Estado denominada "SANTA ANA", para la investigación de recursos de wollastonita (Fig. 21), la cual se efectúa por Resolución de 2 de octubre de 1987 con el nº 318 del Libro-Registro correspondiente a la Dirección General de Minas (BOE nº 296 de 11 de diciembre de 1987).

El P.I. "AROCHE" se encontraba situado en la parte más septentrional de la provincia de Huelva, en las estribaciones occidentales de la Sierra de Aracena, denominadas Sierra de Aroche (Fig. 22). El único acceso lo constituía la C^a. N-433 (Sevilla-Lisboa), así como una serie de caminos que partían desde Aroche cruzando el permiso casi en su totalidad (DGM-ENADIMSA, 1988).



Fig. 22.- Situación geográfica de la zona de Aroche

La topografía era de lomas suaves, separadas por barrancos anchos y pronunciados, con una diferencia de cotas apreciable. El Barranco de la Villa, sin agua durante todo el año, es el más importante y cruzaba el permiso de S a N.

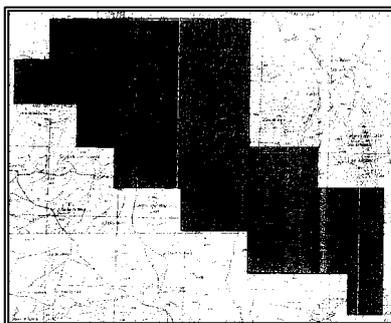


Fig. 23.- Representación del P.I. "AROCHE"

El permiso constaba de 35 cuadrículas mineras, unas 1.350 ha (Fig. 23), y estaba delimitado por las siguientes coordenadas geográficas:

VÉRTICE	Coordenadas geográficas (Greenwich)	
	Longitud O	Latitud N
1	6° 55' 50"	37° 56' 40"
2	6° 55' 50"	37° 55' 40"
3	6° 55' 10"	37° 55' 40"
4	6° 55' 10"	37° 55' 20"
5	6° 54' 30"	37° 55' 20"
6	6° 54' 30"	37° 54' 20"
7	6° 54' 50"	37° 54' 20"
8	6° 54' 50"	37° 54' 40"
9	6° 55' 50"	37° 54' 40"
10	6° 55' 50"	37° 55' 00"
11	6° 56' 30"	37° 55' 00"
12	6° 56' 30"	37° 55' 20"
13	6° 57' 10"	37° 55' 20"
14	6° 57' 10"	37° 55' 40"
15	6° 57' 30"	37° 55' 40"
16	6° 57' 30"	37° 56' 00"
17	6° 58' 10"	37° 56' 00"
18	6° 58' 10"	37° 56' 20"
19	6° 57' 50"	37° 56' 20"
20	6° 57' 50"	37° 56' 40"

La morfología del área donde se ubicaba el permiso, caracterizada por una orografía de sierras y valles paralelos entre sí, estaba claramente ligada a un control geológico y estructural de los materiales constituyentes (Fig. 24).

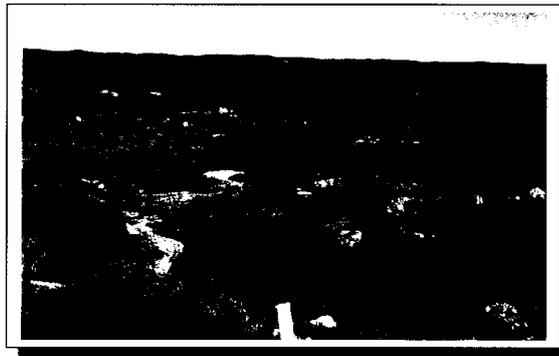


Fig. 24.- Vista panorámica de la zona. En primer plano se observa uno de los principales socavones realizados durante la investigación (Foto J.M. Baltuille)

El P. I. "AROCHE" se enclava en la parte meridional de la Zona de Ossa-Morena (ZOM), en el límite con la Zona Sur-Portuguesa (ZSP), definido por una gran fractura con dirección ONO-ESE. Los materiales que le integran se disponen en bandas paralelas, de dirección variable (NO-SE y ONO-ESE) y están afectados por un metamorfismo de grado medio-alto. Estratigráficamente estos materiales pertenecen al Cámbrico, constituyendo una serie vulcanosedimentaria de gran variedad litológica y espesores variables.

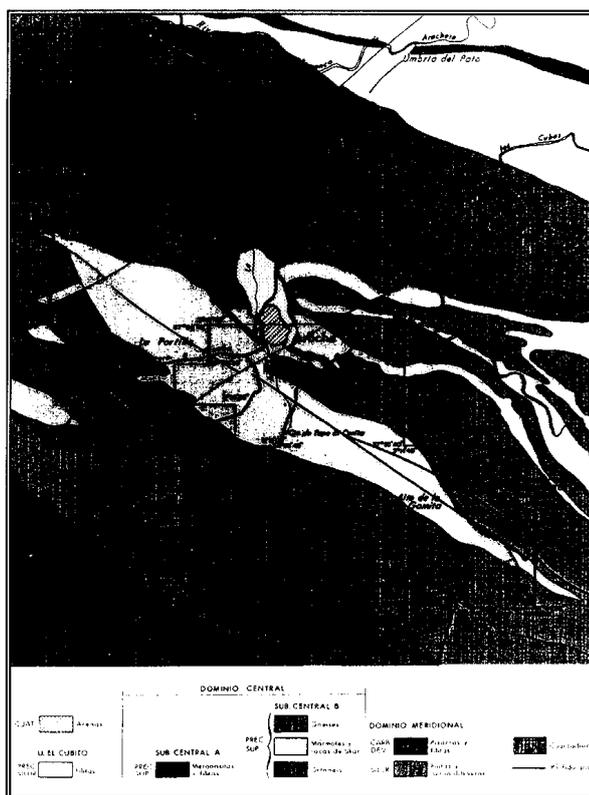


Fig. 25.- Mapa geológico de las proximidades del P.I. "AROCHE" (según DGM-ENADIMSA, 1988)

Las litologías preferentes son los mármoles con diópsido y/o forsterita, neises cuarzo-feldespáticos, neises migmatíticos y grafitosos, ortoneises, esquistos, pórfidos graníticos, rocas de skarn, corneanas y algunas intrusiones graníticas y gabroideas, de edad hercínica, que atraviesan el conjunto anterior afectándole de manera importante y, aflorando, en el borde SO del permiso (Fig. 25).

Tectónicamente la zona es muy compleja, debido a la superposición de, al menos, cuatro fases de deformación. La F_1 da lugar a pliegues isoclinales tumbados muy apretados, con gran desarrollo de sus flancos invertidos y una vergencia S-SO. Suelen ir acompañados de una esquistosidad de flujo muy penetrativa, paralela o subparalela a la estratificación y por fracturas inversas. Ejemplo de estas fracturas, paralelas a las capas y plegadas por fases posteriores, es la Falla Ficalho-Almonaster.

La F_2 origina una nueva generación de pliegues volcados e incluso tumbados, de tendencia similar a los anteriores de la F_1 , pero con vergencias S y O-NO y esquistosidad de fractura bastante penetrativa. Los pliegues suelen presentar un engrosamiento en zonas de charnela y fuertes adelgazamientos en los flancos.

La F_3 es la responsable de las macroestructuras de la zona, caracterizándose por la formación de pliegues cilíndricos con plano axial subvertical, de dirección NNO-SSE, que ocasionalmente se presentan algo volcados y, con frecuencia, fallados por el flanco invertido. Producen una esquistosidad de fractura muy espaciada, coincidente con el plano axial. En ocasiones, estos pliegues presentan tendencias "chevron" con charnelas muy poco desarrolladas.

La F_4 es de menor importancia cartográfica en la zona. Da lugar a pliegues someros, de carácter retroconvergente, con ejes que varían entre $N30^\circ E$ y $N30^\circ O$ (predominan los N-S), geometría cilíndrica y fracturación subvertical espaciada. Estos pliegues alcanzan su máximo desarrollo entre Aroche y Cortegana, al sur del Alto de Tabaca.

La fracturación está bien desarrollada, pudiendo distinguirse dos sistemas principales. El más antiguo presenta direcciones coincidentes con las estructuras regionales, NO-SE a ONO-ESE, y consta de fallas de cizallamiento con fracturas de desgarre, que son aprovechadas por los pórfidos graníticos para su ascenso.

El segundo sistema está caracterizado por fracturas transversales a las estructuras (fracturas de tensión) y que presentan direcciones NE-SO. Dentro de este grupo incluimos otro conjunto, de dirección NNO-SSE, que, aunque menos frecuentes que las NE-SO, son fracturas de compleja historia, frecuentemente plegadas y difíciles de detectar.

La wollastonita aparece siempre ligada a la formación marmórea, presentándose como agregados cristalinos, con cristales individuales que poseen tamaños entre uno y varios centímetros, y que se disponen según un mosaico sin orientaciones preferenciales. El color es blanco muy puro, con brillo nacarado y escasa impurezas. Las fibras son duras y frágiles, con ratios $> 20:1$.

Tabla 4. Análisis tipo de la wollastonita de Aroche

ELEMENTO	(%)
SiO ₂	46.36-50.28
CaO	39.18-43.66
MgO	0.33-2.32
Fe ₂ O ₃	0.35-1.71
Al ₂ O ₃	0.10-1.00
Na ₂ O	0.03-0.67
K ₂ O	0.05-0.96
PPC	1.31-7.74

Los análisis químicos realizados dieron los resultados que quedan recogidos en la Tabla 4, siendo éstos similares a los de la wollastonita de Willsboro (EE.UU), Belkappahar (India) y Lappeenranta. (Finlandia).

El trabajo se desarrolló en dos fases diferentes, durante los años 1987 y 1988. Los trabajos realizados en la 1ª Fase (1987), sobre una superficie de 150 ha, permitieron definir un esquema geológico concreto, donde la formación wollastonítica aparecía ligada a un potente paquete calcáreo (mármoles y calizas del Precámbrico superior-Cámbrico inferior).

Las calizas y mármoles, que presentan una dirección N110-120°E y buzamientos 60°N, afloran en bandas discontinuas que pueden alcanzar 6-8 km de longitud por 1 km de anchura. Son de tonalidades blancas, grises y verdosas de gran vistosidad y aparecen intercalados, fundamentalmente, entre los neises cuarzo-feldespáticos. Originalmente se trataba de un tramo de calizas bioconstruidas (formación estromatolítica), transformadas a mármoles por un metamorfismo medio-alto (Fig. 26). El proceso de metamorfismo de contacto, que incluía fases de metasomatismo intenso, se originó por las intrusiones graníticas próximas y estaba acompañado por enriquecimientos en sílice a través de fracturas (diques de cuarzo), lo que facilitó la formación de la wollastonita en los tramos brechoides de las formaciones biostrómicas (DGM-ENADIMSA, 1988).



Fig. 26.- Núcleo de construcción estromatolítica, en la ladera meridional del Alto de la Fábrica (según Griffó Navarro y Rincón Mayoral, 1990)

Genéticamente la wollastonita coincidía con un proceso de skarnificación de las calizas, asociándose a aquella, como minerales minoritarios, el diópsido (7-10 %) o la hedenbergita y como accesorios, la calcita (3-9 %), el cuarzo (2-13 %), el feldespato potásico (0,5-1,6 %), la esfena y el granate. La localización de los tramos wollastoníticos aparecía estrechamente ligada a la presencia de tramos brechoides, que se repiten en cada una de las secuencias estromatolíticas que constituyen la serie carbonatada.

En esta fase se abrieron 2.574 m de calicatas, distribuidas en 5 zanjas (transversales a la formación) de dirección N-S y otras 4 no alineadas con las anteriores. Igualmente se realizaron 15 sondeos inclinados, con un total de 801 m perforados.

Desde el punto de vista químico-mineralógico, en la Tabla 5 se presentan los resultados de las 19 muestras recogidas durante la campaña, comparándolas con una muestra patrón (C-1)⁶.

Tabla 5. Parámetros indicativos de la pureza de las muestras						
MUESTRAS	PPC	CaO (CO₃Ca)	CaO (SiO₃Ca)	SiO₂ (SiO₃Ca)	SiO₂/CaO (teórico 1.07)	Wollastonita (%)
C-1	1.21	1.54	45.46	48.64	1.11	94.1
1	2.11	2.69	38.51	41.20	1.31	79.7
2	3.51	4.47	36.11	38.64	1.37	74.7
3	1.72	2.19	42.42	45.39	1.19	87.8
4	5.23	6.64	38.36	41.04	1.20	79.4
5	1.02	1.29	44.11	47.20	1.16	91.3
6	1.77	2.25	36.55	39.11	1.47	75.7
7	1.20	1.52	42.37	45.34	1.24	87.7
8	3.85	4.89	36.26	38.79	1.35	75.1
9	6.29	7.99	36.00	38.52	1.24	74.5
10	0.98	1.24	42.89	45.89	1.18	88.8
11	1.56	1.98	44.54	47.66	1.12	92.2
12	2.79	3.54	39.06	41.79	1.29	80.8
13	3.00	3.81	41.18	44.06	1.17	85.2
14	4.07	5.17	40.88	43.74	1.17	84.6
15	2.43	3.09	41.26	44.15	1.20	85.4
16	3.82	4.85	39.97	41.80	1.26	80.9
17	0.87	1.10	39.16	41.90	1.43	81.1
18	3.49	4.43	40.87	43.73	1.20	84.6
19	2.65	3.36	39.14	41.88	1.33	81.0

Fuente: DGM-ENADIMSA (1988)

Como método de concentración se proponía:

- ◆ separación de la calcita mediante flotación aniónica
- ◆ deslamado
- ◆ eliminación del diópsido mediante la separación magnética de alta intensidad por vía húmeda(SMAIH)

La separación wollastonita-cuarzo resultaba muy difícil, dadas las similitudes que presentaban ambos minerales. Los mejores resultados se obtuvieron mediante la flotación aniónica a pH=11, aunque sólo se recuperó un 42.15 % del "todo-uno".

⁶.- Se trataba de una wollastonita de tipo comercial procedente de EE.UU. (N.A.).

Dadas sus características tecnológicas se consideraba que el mineral podría tener aplicación en la industria cerámica (azulejos, fritas, esmaltes, etc.) y, posiblemente, como sustituto de asbestos y como carga industrial, siempre que las reservas y la homogeneidad del yacimiento lo justificasen (Fig. 27).



Fig. 27.- Detalle de la wollastonita de Aroche (Foto S. Mirete)

En la 2ª Fase de investigación (1988) se seleccionó una zona de 90 ha, donde la presencia de wollastonita era más abundante que en el resto del permiso, y que comprendía los Altos del Carmen y de la Fábrica. Esta zona se redujo posteriormente a un área de 13 ha, centrada en el Alto de la Fábrica, en la que se realizó la campaña de calicatas y sondeos (Fig. 28).

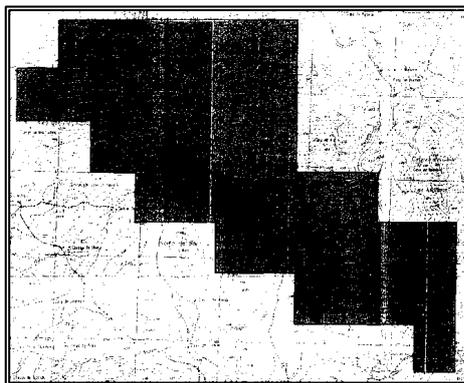


Fig. 28.- Representación, dentro del P.I. "AROCHE", de la zona donde se intensificó la investigación (rectángulo veda oscuro y rojo)

En esta fase se realizaron 15 calicatas, con un total de 1.585 m y unas profundidades que oscilaban entre 0.5-4.5 m. A diferencia de la fase previa estas calicatas se proyectaron paralelas a la dirección de las estructuras, para conocer así la evolución lateral del yacimiento (Figs. 29 y 30).

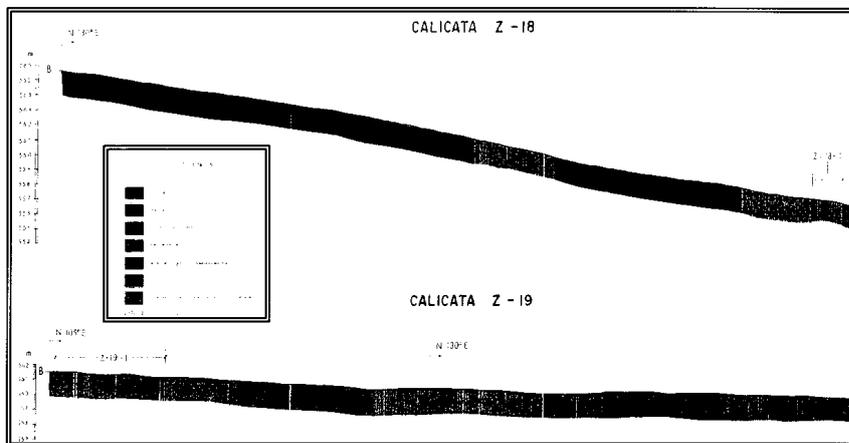


Fig. 29.- Representación del tipo de afloramiento reflejado por las calicatas, en la campaña de 1988 (según DGM-ENADIMSA, 1988)

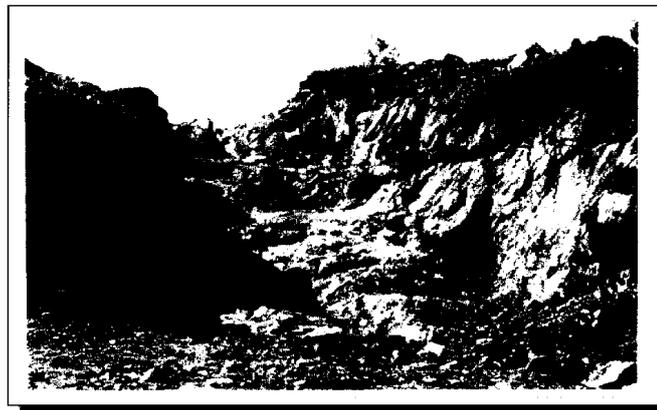


Fig. 30.- Detalle de la trinchera N-S realizada durante la campaña de 1991 de *Almagrera S.A.* para ensayo de explotación selectiva (Foto *Almagrera, S.A.*)

La campaña de sondeos realizada en la 1ª Fase estuvo enfocada como campaña de reconocimiento del permiso, distribuyéndose los sondeos perpendicularmente a las direcciones regionales y con una amplia separación entre ellos. En la 2ª Fase el objetivo de los sondeos era calcular las leyes y el volumen de la wollastonita existente, por lo que se colocaron según una malla centrada de 50 x 50 m, con una dirección N65°E que era paralela a las estructuras (Fig. 31).

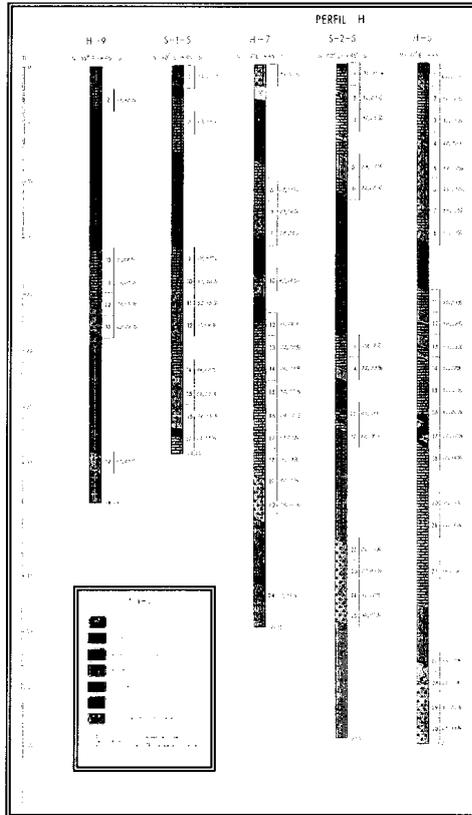


Fig. 31.- Representación de una serie de columnas de diferentes sondeos realizados en el P.I. "AROCHE" (según DGM-ENADIMSA, 1988)

Se perforó un total de 2.004 m repartidos en 41 sondeos. La perforación se realizó a rotación y con extracción de testigo continuo, obteniéndose un total de 1.865 m de testigo extraído, lo que supone una recuperación del 93 % a pesar de la karstificación incipiente existente.

Las campañas de calicatas y sondeos, realizadas en el Alto de la Fábrica, permitieron conocer la interrelación de la wollastonita con sus rocas de caja. La mineralización se presenta en tres formas diferentes:

- a) Nivel marmóreo totalmente wollastonitizado, sin que queden restos de la roca original (mármol). El mineral se presenta muy puro, sin impurezas y con estructura fibrosa.

- b) Roca brechoide compuesta fundamentalmente por cuarzo y wollastonita en proporciones muy variables, de manera que cualquiera de los dos tipos litológicos puede ser el predominante. Completan la litología de la roca brechoide pequeños porcentajes de mármol y rocas de skarn.
- c) Capa de mármol wollastonítico, del que forma parte en proporciones casi nunca superiores al 50 % (Fig. 32).

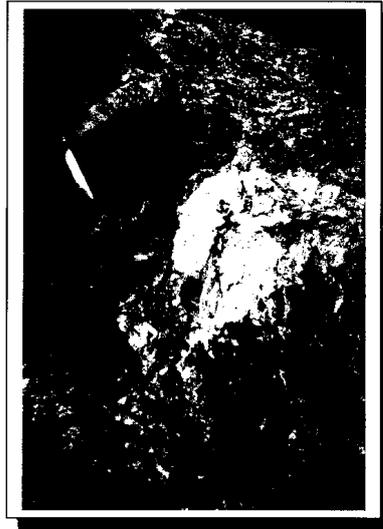


Fig. 32.- Detalle de la mineralización de wollastonita, tal como aparece en el socavón reflejado en la Fig. 30 (Foto J.M. Baltuille)

La información aportada por las calicatas, referente a la continuidad de los niveles de wollastonita, demuestra que existe una lateralidad del yacimiento escasa, puesto que se producen abundantes cambios litológicos. Dato importante a la hora de evaluar el yacimiento.

Inicialmente, tras someter a 652 muestras al método del "krigeage", se obtuvo para el yacimiento una ley media del 22.29 % de mineral y unas reservas superiores a 1.8 Mt. Posteriormente, y tras un estudio geoestadístico más completo, se determinó una ley media para el yacimiento de 26.68 % y unas reservas de 1.5 Mt.

Posteriormente, Griffó Navarro y Rincón Mayoral (1990) transcriben prácticamente la información recogida en DGM-ENADIMSA (1988 y 1989), sin aportar nada nuevo a la investigación del yacimiento.

El ITGE (1991b), en la hoja de Puebla de Guzmán-Sevilla del Mapa de Rocas y Minerales Industriales a escala 1:200.000, recoge y describe una serie de indicios de wollastonita situados en la zona de Aroche y citados dispersamente en la bibliografía anterior. Estos indicios de wollastonita se encuentran todos ellos en la Hoja nº 916 (Aroche) del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50.000, y se localizan al oeste y sur de este municipio (Tabla 6).

Tabla 6. Características de los principales indicios de wollastonita de Aroche									
INDICIOS	9	13	14	15	16	17	18	19	20
ESTACIONES	Alto del Carmen	Las Bañitas	Cerro Montero	Cerro Montero	Cabezo del Coto	Cortijo de Cornelio	Cortijo de Cornelio	Cortijo de Cornelio	Casas de Rufo
Coordenadas									
X	680.70	675.20	674.85	674.20	670.40	671.25	671.40	671.50	671.65
Y	4199.30	4206.90	4200.85	4201.10	4102.85	4202.40	4202.00	4201.80	4201.75
Composición química									
SiO ₂	46.1-56.1	11.00	51.20	47.73	57.00	46.70	41.20	50.50	0.95
Al ₂ O ₃	0.36-3.00	0.90	0.70	0.50	0.30	0.20	0.50	0.20	0.30
CaO	38.8-46.5	49.10	41.80	45.50	39.00	46.60	45.90	46.00	53.10
Fe ₂ O ₃	0.40-1.85	0.67	0.66	0.45	0.60	0.50	0.86	0.36	0.32
MgO	0.38-3.75	0.75	2.90	0.80	0.65	0.50	1.05	1.60	3.22
K ₂ O	< 0.02-0.79	0.20	0.40	0.22	0.12	0.07	0.26	0.03	0.07
Na ₂ O	< 0.02-0.39	0.45	0.08	0.08	0.09	0.05	0.08	0.07	0.08
PPC	0.20-6.2	37.40	1.92	4.13	2.95	5.52	10.40	1.51	41.10
Composición mineralógica normal									
Diópsido		4.03	15.58	4.30	3.49	2.69	3.64	8.60	-
Calcita		85.19	4.36	9.40	6.71	12.55	23.74	3.43	93.50
Wollastonita		0.79	73.16	81.04	71.12	80.51	64.58	86.69	0.70
Cuarzo		8.36	4.72	3.43	18.28	3.57	4.67	0.94	-
Otros		1.63	2.18	1.83	0.39	0.68	1.37	0.34	1.83

Fuente: DGM-ENADIMSA (1988 y 1989), ITGE (1991b)

En 1989 *Minas de Almagrera S.A.* se hace con el dominio minero de *ENADIMSA* en la zona de Aroche. A partir de entonces, y por parte del departamento de Geología de *Almagrera S.A.*, se realizaron trabajos específicos de detalle: cartografía geológica, calicatas, reinterpretación de los sondeos mecánicos realizados por *ENADIMSA* y elaboración de secciones geológicas (Fig. 33). Los trabajos se iniciaron con la extracción de dos muestras de mineral, de 600 t en total, para realizar ensayos de procesamiento industrial y sobre litologías representativas del yacimiento, es decir, wollastonita con cuarzo y wollastonita con mármol. Estos ensayos industriales se realizaron en colaboración con la empresa finlandesa *Partek* (ITGE, 1991b) enviándose para ello el material a Finlandia.

De otro lado, los reconocimientos geológicos de detalle demostraron que el principal control geológico de la mineralización wollastonítica era estructural, siguiendo la mineralización la fracturación regional NO-SE a ONO-SSE. Esta fracturación es aprovechada para el ascenso de pórfidos graníticos a los que se asocian fluidos silíceos que originarían diques de cuarzo directamente, o bien, por reacción con el mármol encajante, wollastonita. Según esto, y a efectos prácticos, el yacimiento wollastonítico podría ser considerado como un campo filoniano con estructuras de cuarzo, cuarzo con wollastonita, wollastonita masiva y mármoles wollastoníticos, todas encajadas en mármoles precámbricos, separadas físicamente y separables mediante un proceso minero de extracción selectiva, lo que permitiría solucionar uno de los grandes problemas mineralúrgicos, la separación del cuarzo de la wollastonita.

Para la comprobación del modelo geológico fue realizado un ensayo de explotación selectiva consistente en la apertura, mediante empleo de explosivos, de una zanja de 70 m de longitud, y más de 4 m de

profundidad (Fig. 30) transversal al yacimiento y planificada de forma que atravesase las distintas litologías características del yacimiento y antes enumeradas, extrayéndose un total de 3.300 t de material.

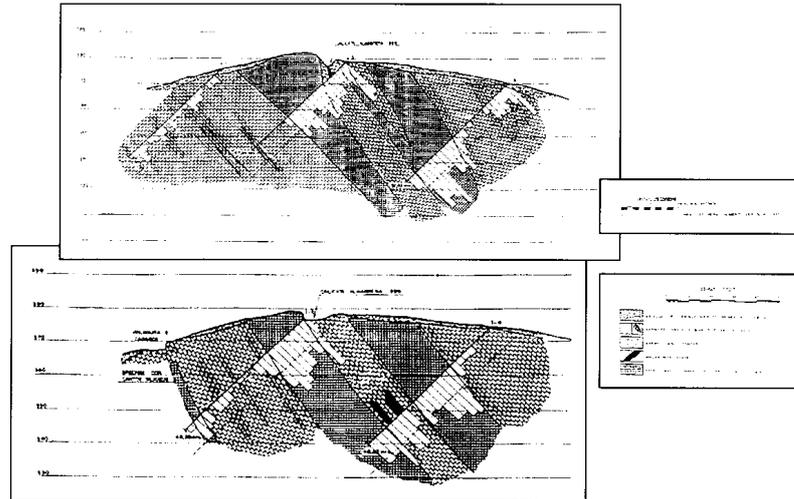


Fig. 33.- Secciones geológicas de la parte central del yacimiento wollastonítico de Aroche (gentileza de *Almagrera, S.A.*)

El ensayo permitió no sólo la visualización de la separación física de las distintas estructuras mineralizadas, sino que pudieron ser individualizadas y separadas durante la extracción, con la ventaja que ello supondría en un posible proyecto de explotación.

En la Fig. 34 se muestran los montones de los diferentes tipos de material seleccionado que fueron triturados de forma separada y almacenados individualmente en una explanada junto a las instalaciones de la Mina Sotiel en Calañas (Huelva) para posteriores estudios y ensayos.



Fig. 34.- Montones de los diferentes tipos de material obtenidos en el ensayo de explotación selectiva (Foto B. Caballero)

Esta fase de investigación realizada por *Almagrera S.A.* concluyó con unos resultados positivos y alentadores a la hora de proponer una minería selectiva en el aprovechamiento de esta mineralización wollastonítica.

Posteriormente se localizó otro afloramiento de wollastonita, denominado La Alcalabozza, cerca del pueblo de Aroche. Este indicio se supone que es una continuación del yacimiento principal, habiéndose registrado calidades de wollastonita de hasta el 84-87 %.

4.3.- COLMENAR VIEJO (MADRID)

La presencia de minerales de metamorfismo en las proximidades de Madrid, y concretamente de wollastonita, era conocida desde hacía unas tres décadas, aunque sus referencias eran muy incompletas.

De esa época es una referencia en el Puerto de Navacerrada, atribuida a Sos Baynat⁷, a unos 200 m del aparcamiento y en el terreno que ocupaba el antiguo destacamento de aviación (en la actualidad no ha sido posible localizar dicho indicio).

No obstante, las primeras referencias escritas que encontramos se deben a Galán Huertos y Mirete Mayo (1979), quienes citan la presencia de wollastonita en diversas zonas de España y en una serie de puntos de la CC.AA. de Madrid: Colmenar Viejo, C^a. de Guadalix, Somosiera y Navacerrada.

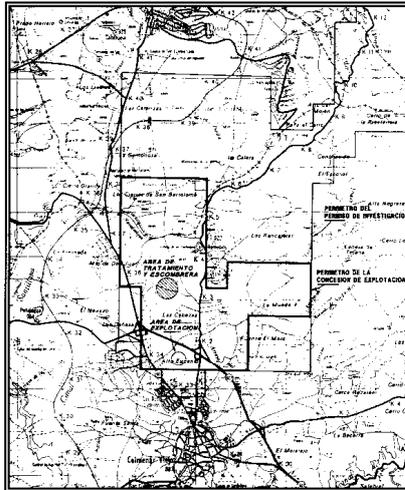


Fig. 35.- Situación geográfica del P.I. "CALBACHE III"

⁷- Comunicación personal a Mirete Mayo (N.A.)

La investigación de wollastonita en la zona de Colmenar Viejo se inicia en noviembre de 1980, cuando la *Sociedad Minera de San Albin, S.A. (SMSA)*, grupo subsidiario de *Rhône-Poulenc*, solicita un Permiso de Exploración en la zona. El P.E. "CALBACHE III", con nº 2.800 (1-0-0) del registro minero de Madrid, fue definitivamente otorgado a la compañía el 21 de marzo de 1984.

Más tarde, el 29 de abril de 1988, se le adjudica a su vez el P.I. "CALBACHE III" con nº 2.800 (1-3-0), derivado del Permiso de Exploración homónimo y afectando a los términos municipales de Colmenar Viejo, Soto del Real, Guadalix de la Sierra y Miraflores de la Sierra (Fig. 35).

Las labores de investigación realizadas sobre las 3.810 ha que cubría la superficie del citado permiso, permitieron evaluar un yacimiento de wollastonita, por lo que se tramitó la solicitud de Concesión de Explotación de la zona más meridional del permiso, lo que suponía unas 1.140 ha.

Los objetivos previstos eran:

- obtener un concentrado de wollastonita de interés comercial
- aprovechar como árido parte de los estériles de la mina
- utilizar los rechazos del concentrador como arena de limpieza (chorro de arena)
- conseguir la independencia de importaciones de productos de EE.UU. y Finlandia y responder así a las necesidades nacionales y de la UE

La ubicación de la Concesión de Explotación solicitada ocupaba sólo, prácticamente, territorio del ayuntamiento de Colmenar Viejo (Fig. 36). La comunicación era perfecta con Madrid, de la que dista 31 km, pues la concesión de explotación estaba atravesada por diversas carreteras, nacionales y autonómicas: M-607 (autovía Madrid-Guadarrama), M-602 (Colmenar Viejo-Miraflores de la Sierra), M-631 (Colmenar Viejo-Guadalix de la Sierra) y el ferrocarril (la línea Madrid-Irún distaba unos 2.5 km del área).

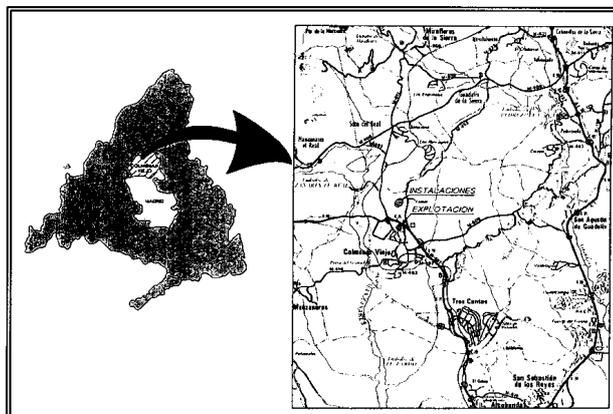


Fig. 36.- Situación geográfica del área de Colmenar Viejo

El yacimiento se localizaba en el Alto Eugenio (971 m), entre la urbanización La Colina de las Torres y la M-607. La planta de tratamiento y la escombrera se ubicarían más al norte, en la ladera del cerro de Las

Cabezas, entre las carreteras locales de Guadalix de la Sierra al este y la de Miraflores al oeste. Ocupando todo el complejo unas 21.2 ha de terrenos privados del municipio de Colmenar Viejo.

El mineral se encontraba diseminado en las calizas metamórficas de la zona (skarn) y presentaba una riqueza media del 30 %, aunque a veces llegó a alcanzar el 60 %. Los minerales accesorios principales eran calcita (50 %) y granate (20 %).

De los trabajos de investigación realizados se evaluaron, en el área del "Alto Eugenio", unos recursos geológicos del orden de los 5 Mt, de los que 1.7 Mt representaban reservas seguras, económicamente explotables de acuerdo con los diseños mineros y ensayos de concentración estudiados.

El ritmo de producción previsto era del orden de las 30.000 t/año al inicio, para alcanzar las 150.000 t/año a pleno rendimiento, lo que daba una vida media al yacimiento de unos 12 años.

4.3.1.- CARACTERÍSTICAS DE LA EXPLOTACIÓN

La explotación se preveía llevar a cabo mediante un cielo abierto con los siguientes parámetros:

- altura de banco de explotación: 5 m
- talud final: 60° y 45°, dependiendo del tipo de roca
- talud de banco: 72° (inclinación 3:1)
- plataforma mínima de trabajo: 25 m

Durante las actividades previas de investigación se constató que el arranque debería hacerse mediante explosivos, ya que únicamente las arenas cretácicas eran susceptibles de ser extraídas mediante arranque directo (retroexcavadora, pala frontal).

4.3.2.- EQUIPAMIENTO

La maquinaria que se tenía previsto emplear para la explotación era:

- *Perforación*
Mediante carro perforador sobre orugas, con compresor independiente o incorporado al propio carro y captador de polvo, para perforar a 89 mm con martillo en fondo del barreno
- *Carga y transporte*
 - pala de orugas, de ataque frontal, con cazo de 4,5 m³ de capacidad
 - camiones de tres ejes, basculantes, de 25 t de carga útil
- *Equipos auxiliares*
 - camión-cuba para el riego de pistas y tajos, lo que evitaría la emisión de polvo a la atmósfera. Tomándose el agua de la balsa de residuos prevista en la planta de tratamiento
 - motoniveladora para el arreglo y mantenimiento de las pistas

4.3.3.- PROCESADO

Respecto a la planta de tratamiento, se había diseñado con el fin de cumplir los siguientes requisitos:

- ✓ obtener un concentrado comercial de wollastonita
- ✓ enriquecer la fracción de granates para comercializarla, principalmente, como arena de limpieza por chorro o como abrasivos
- ✓ depositar adecuadamente la calcita y en su día reutilizarla como fuente de óxido cálcico
- ✓ triturar y clasificar el estéril silíceo para su aprovechamiento como árido
- ✓ maximizar el aprovechamiento del agua, mediante recirculación del proceso

En la corta se generarían unas 84.000 t/año de estéril, a causa del material silíceo existente, que se trituraría y emplearía fácilmente como árido para la construcción y obras públicas, dada la proximidad con Madrid y su área urbana.

El procesado del producto constaría de las siguientes fases:

- *Trituración*
Se recibiría el “todo-uno” de la corta junto con el estéril y se reduciría de 1.000 a 12 mm mediante la acción, en dos etapas, de una machacadora de mandíbulas.
- *Molienda y deslamado*
Sería la primera etapa del proceso que se realizaría por vía húmeda, aprovechando el agua recuperada y aportando un 12 % de agua fresca por pérdida.

En esta etapa se llegaría al tamaño de liberación de los distintos minerales a recuperar, debiéndose eliminar los más finos por entorpecer y descontrolar el proceso de flotación.

La separación de ultrafinos se realizaría mediante un ciclonado. Este corte se realizaría mediante vía húmeda, recuperándose parte del agua en un tanque decantador, enviándose los fangos del tanque al dique de residuos o dique de calcita.
- *Flotación*
El método previsto era la Flotación Diferencial Escalonada eliminando, en primer lugar, la totalidad de la calcita que pudiera quedar en el circuito, utilizando para ello agentes colectores y espumantes en pulpa neutra (pH ~ 7.5). Las espumas resultantes del concentrado de calcita se enviarían, con las lamas del ciclón, a un decantador.

En segundo lugar se flotarían los silicatos (granates y arenas), espesando y acidificando la pulpa. Las espumas flotadas pasarían a un filtro espesador, donde se recuperarían los silicatos y granates, devolviéndose el agua (pH = 5-6) al circuito tras su neutralización en el dique de calcita.

El residuo de la última flotación sería el concentrado de wollastonita, el cual se decantaría y filtraría antes de su almacenamiento. Las aguas, cuyo pH fuese de 6-6.5, serían neutralizadas en el dique de calcita antes de su posterior reutilización.
- *Dique de calcita*
Se ubicaría en las proximidades del concentrador, siendo su misión el almacenar la calcita como único residuo del proceso. También se empleará para neutralizar aquellas aguas del proceso que tuviesen un pH ligeramente ácido, antes de ser reutilizadas de nuevo en el circuito.

En un futuro, se preveía el comercializar la calcita depositada en el dique, en función de la demanda y precios del mercado.
- *Reactivos*
Todos los productos a utilizar en el proceso, a excepción del SO_4H_2 , serán orgánicos, inocuos y degradables; respecto al SO_4H_2 este se neutralizaría mediante la calcita, produciéndose SO_4Ca que precipita como yeso.

4.3.4- UBICACIÓN DEL COMPLEJO

La extracción comenzaría en el Alto Eugenio, situado entre el núcleo urbano de Colmenar Viejo y la autovía M-607.

Lo pequeño del emplazamiento y las posibles ampliaciones que determinasen las investigaciones futuras, aconsejaban emplazar la escombrera y las instalaciones de tratamiento al otro lado de la autovía, desfiladas de ella y fuera de la zona potencialmente mineralizada (Fig. 37).

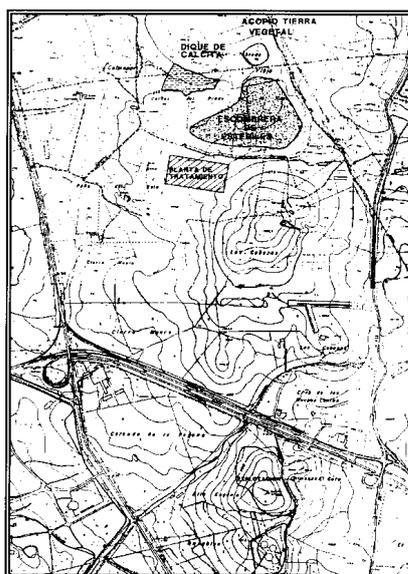


Fig. 37.- Propuesta prevista para la implantación de la explotación

Durante 1992 la *Sociedad Minera San Albin (SMSA)* llevó a cabo una campaña de sondeos de exploración en la zona. Mediante los 1.600 m perforados por la compañía se identificaron unas 3.5 Mt de "todo-uno", con una ley media del 26 % y un contenido estimado de 900.000 t de wollastonita (Anónimo, 1992; Fattah, 1994).

A mediados de 1992 *Rhône-Poulenc* transfirió una parte del permiso de exploración a *Barytine du Hainaut*, de Montpellier (Francia), como parte del mismo proyecto e iniciación de un nuevo programa de exploración. *Barytine du Hainaut*, del grupo *Garrot-Chaillac*, explota barita en Bélgica a través de su subsidiaria *Baryum Minerals Inc. Garrot-Chaillac*, también de Montpellier, es el agente que comercializa las baritas que produce *Barytine de Chaillac* en la zona central de Francia, siendo propiedad de *Solvay Barium Strontium GmbH*.

El distrito minero de Colmenar Viejo presentaba también un gran potencial en cuarcitas y corneanas para su uso como áridos. Con la entrada de *Barytine du Hainaut* se iniciaron, en el segundo semestre de 1992, tres pequeñas explotaciones a cielo abierto.

A principios de 1994 los planes para desarrollar el distrito wollastonítico de Colmenar Viejo se encontraron con una fuerte oposición por parte de la comunidad local (Fig. 38). Los vecinos de Colmenar se mostraron en contra del desarrollo del yacimiento, por considerarlo un riesgo potencial para sus

Mientras tanto las autoridades declararon que el proyecto continuaría siempre que el AMA aprobase su desarrollo. Se estimaba que la mina, con un precio del mineral de 50.000 PTA/t y una vida media de unos 12 años, produciría unos beneficios del orden de los 45.000 MPTA.

SMSA consideró que las reclamaciones locales eran totalmente injustificadas pero, aunque eran bastante preocupantes para el desarrollo del proyecto, había que esperar al resultado del informe del AMA.

Existía una posibilidad alternativa que era la de trasladar el proyecto a unos 2-3 km al norte del pueblo, aunque se necesitarían una nueva evaluación y nuevos sondeos.

Finalmente el proyecto se suspendió a principios de 1995, renunciando la empresa a la explotación dada la cantidad de problemas de índole social con que se encontró.

4.4.- ALDEA DEL OBISPO (SALAMANCA)

A finales de la década de los 80 la empresa *Desarrollo de Recursos Geológicos, S.A (DRG)* descubrió la presencia de wollastonita en una zona al SO de la provincia de Salamanca, NO de Ciudad Rodrigo, dentro de la Hoja nº 500 (Villar de Ciervo) del MTN a escala 1:50.000.

El yacimiento se encuentra en la localidad de Aldea del Obispo, en el paraje del Teso Pizarra-Las Liebres, a 2.5 km al norte del núcleo urbano y muy próximo al límite fronterizo con Portugal (Fig. 39).

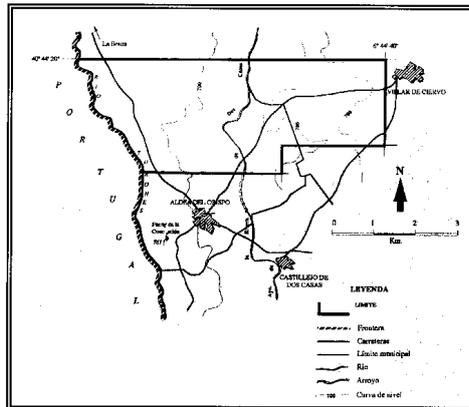


Fig. 39.- Situación de la zona y representación del dominio minero

El dominio minero actual es la C.E. "ILUSTRACIÓN", nº 6.103 del registro minero de Salamanca, que presenta una extensión de 36 cuadrículas mineras y 5 fracciones (aproximadamente 1.000 ha) y cuyas coordenadas, correspondientes al Huso 29, son:

VÉRTICE	PP.	1	2	3	4	5	6	7
UTM-X	683421.2	690458.3	690490.0	689082.4	689098.1	683936.2	683920.9	683451.7
UTM-Y	4512119.9	4512297.4	4511063.9	4511027.8	4510411.0	4510281.2	4510897.9	4510886.3

Los materiales geológicos que conforman la concesión son metasedimentos y granitos paleozoicos, con algún pequeño retazo de recubrimiento cuaternario.

Las formaciones comprendidas en este área están compuestas, fundamentalmente, por metasedimentos y granitos, con una ligera cobertera cuaternaria. La mayoría de los materiales corresponden al Complejo Esquisto Grauváquico (CEG), de edad preordovícica, que está compuesto de esquistos biotíticos con alternancias claras y oscuras compuestas por niveles cuarcíticos, feldespáticos y metagrauwáquicos; variando, el espesor de los mismos, de unos milímetros a varios centímetros (Fig. 40).

Estos tramos han sido interpretados como sedimentos pobres en oxígeno, depositados en ambientes costeros, donde materiales de diferentes tamaños de grano fueron mezclados tras la alternancia de periodos de fuertes tormentas junto con otros de calma. Estos materiales alternan con niveles laminares calcoscitadados, que corresponden a la serie mineralizada.

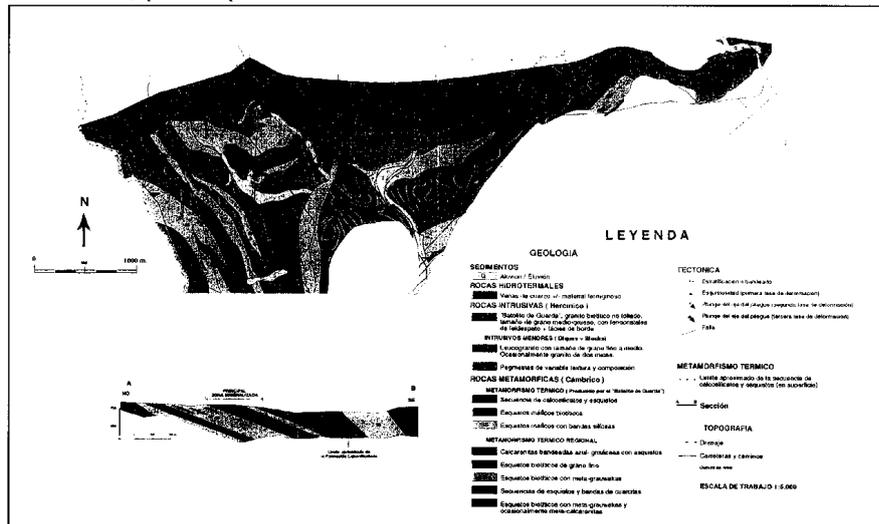


Fig. 40.- Mapa geológico de la concesión "ILUSTRACIÓN" (gentileza de *Cia Minera Ilustración, S.A.*)

La laminación está compuesta por bandas claras de wollastonita que alternan con otras, grises o verdosas, de naturaleza silicea, feldespática o calcítica. Ocasionalmente, aparecen intercalaciones de esquistos biotíticos y, a veces, los niveles wollastoníticos llevan asociado diópsido e idocrasa (Fig. 41).

La zona septentrional del yacimiento corresponde al Batolito de Guarda, de edad hercínica, compuesto por granitos biotíticos porfídicos, no foliados. La textura porfídica se determina por la presencia de fenocristales de feldespato (3-7 cm).



Fig. 41.- Detalle de la serie laminar, compuesta por alternancias esquistosas y calcosilicadas, donde se encuentra el mineral (Foto J.M. Baltuille)

En las proximidades del granito de Guarda afloran otras intrusiones menores, diques y stocks, compuestas por leucogranito de grano fino a medio, granito de dos micas de grano fino, pegmatitas y aplita. En los bordes se encuentran diques cuarcíticos, con un porcentaje variable de material ferruginoso, y cuya longitud varía entre algunos cientos de metros y varios kilómetros, oscilando su espesor entre los 30-50 m.

Los materiales del CEG han sido afectados por varios episodios de deformación (pre-Hercínica y Hercínica). La principal esquistosidad observada es la S_1 , que se desarrolla exclusivamente sobre los materiales más pelíticos, no habiendo sido observada en los niveles carbonatados (Gracia et al., 1999). En las bandas esquistosas la S_1 es muy intensa, presentando los filosilicatos una orientación preferencial, dando lugar a una auténtica pizarrosidad. La lineación de esta primera fase (L_1) se orienta según $N160^\circ/20-25$ SE.

Estas bandas esquistosas fueron crenuladas por la F_3 de la orogenia Hercínica, que causó una tercera esquistosidad (S_3), paralela al plano axial de los micropliegues desarrollados en la S_1 . La principal estructura tectónica dentro de la zona de estudio, el Sinclinal de Aldea del Obispo, se formó durante esta fase de deformación.

Finalmente durante la F_4 se desarrolló una nueva estructura tectónica, cuyo plano axial presenta una dirección N-S que pliega ligeramente las estructuras previas. Durante esta fase de deformación, no se generó esquistosidad alguna.

En el Batolito de Guarda, la orientación preferencial de los fenocristales de feldespato indica que las rocas graníticas fueron intruidas en una etapa de compresión, con una dirección dominante N-S, que podría corresponder a la F_4 .

La banda mineralizada se extiende a lo largo de 4.5 km con unos 35-40 m de espesor, presentando una dirección mayoritaria E-O y un buzamiento de 20-30°S. Los afloramientos de la mineralización terminan, en ambas direcciones, contra la intrusión granítica. Pero hacia el oeste su orientación cambia, N125-145°/35-50°SO, mientras que hacia el este presenta N10-50°/15-35°SE (Gracia et al., 1999)

En 1995 *DRG*, titular del dominio, y la compañía australiana *Gwalia Consolidated Ltd.* iniciaron los acuerdos de cara a constituir un "joint venture" (Anónimo, 1995). No obstante, a finales de 1996, *Gwalia* se retiró del proyecto para poder centrar su atención en las actividades principales y prioritarias de la empresa.

El yacimiento de Aldea del Obispo ya aparece recogido en el Mapa Geológico y Minero de Castilla y León, a escala 1:400.000 (Cabrera Ceñal et al., 1997), quedando perfectamente registrado con el nº 4.710, y donde se señalan los siguientes parámetros:

- Morfología: lenticular
- Tipología: skarn
- Roca encajante: calcosilicato
- Dirección: 0°
- Buzamiento: 72° E
- Longitud: 600 m
- Anchura: 200 m
- Profundidad: 100 m

A mediados de 1997 las compañías españolas *Pydhesa* y *Crimidesa* se unieron a *Desarrollo de Recursos Geológicos, S.A.* para constituir la *Compañía Minera Ilustración, S.L.*, que es la encargada del desarrollo del yacimiento salmantino. En 2000 la compañía se ha transformado en sociedad anónima.



Fig. 42.- Socavón principal (Foto J.M. Baltuille)

Durante los últimos años se han desarrollado en el permiso ininterrumpidos trabajos de investigación, que han incluido varias cartografías a diversas escalas, numerosos desmuestres, realización de varias campañas de trincheras (Fig. 42) y de sondeos con recuperación de testigo y abundantes análisis y ensayos de laboratorio y de usos industriales en diversos sectores, así como estudios de mercado y varios análisis funcionales. El costo de esta investigación ha superado, según fuentes de la empresa, los 600 MPTA.

La mineralización aparece en una roca calcolicitada muy dura, que presenta ocasionalmente intercalaciones de esquistos biotíticos. Independientemente del bandeo presente en la roca calcosilicatada, su composición mineralógica principal es: wollastonita, diópsido, cuarzo, plagioclasa y calcita como minerales principales y zoisita, idocrasa, titanita y epidota como accesorios. La wollastonita se presenta como cristales aciculares que forman el 80-90 % de la roca o como el principal componente de la matriz, junto con cristales de cuarzo y diópsido. En este último caso, la wollastonita presenta una típica textura fibroso-radiada, con una considerable reducción en el tamaño (Fig. 43). La escasa calcita aparece en bandas en las que representa el principal componente y tiene un tamaño de grano mayor que el resto de los componentes. Las bandas estériles están compuestas, principalmente, de cuarzo, diópsido o son de composición típicamente calco-arenítica.

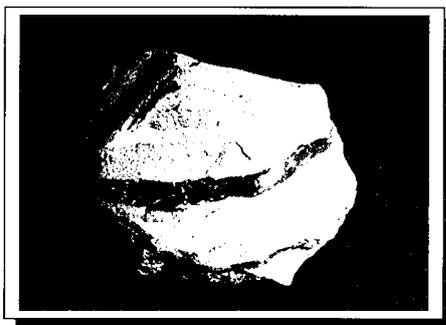


Fig. 43.- Ejemplar de wollastonita de Aldea del Obispo (Foto S. Mirete)

De los estudios geológicos y mineralógicos realizados se pueden definir tres diferentes conjuntos mineralógicos:

wollastonita - diópsido - plagioclasa + esquistos
wollastonita - calcita - diópsido - plagioclasa + esquistos
wollastonita - diópsido - plagioclasa - cuarzo + esquistos

La wollastonita aparece bajo tres aspectos:

- en fibras largas, bien visibles a simple vista
- en fibras cortas, diferenciables a la lupa
- en pequeñas fibras microscópicas, como componente principal de la matriz de la roca que la contiene

La wollastonita presenta un ratio de 5:1, el cual puede aumentarse, mediante un tratamiento adecuado, hasta valores > 20:1. El índice de blancura de la mena (wollastonita sin refinar) es del 85 %.

Los resultados de los análisis efectuados sugieren que un minado controlado en cantera permitiría una separación de dos tipos de menas, una de ellas con muy bajo contenido en calcita y, en consecuencia, de beneficio relativamente sencillo, y otra con mayores contenidos en calcita, que obligaría a una flotación diferencial. El estudio de los cortes geológicos realizados a partir de los sondeos efectuados, con una malla 50 x 50 m, indica que sería viable una explotación selectiva de cada una de las menas, puesto que se encuentran localizadas en un tramo delimitado de la columna geológica y presentan buena continuidad lateral en el yacimiento.

Los trabajos realizados, que se han centrado especialmente en el arco más occidental de la mineralización, han proporcionado la siguiente estimación de reservas geológicas para una explotación a cielo abierto son:

- [-] probadas: 4.5 Mt (con el 35 % de wollastonita)
- [-] probables: 25 Mt
- [-] posibles: 75 Mt

Las reservas probables corresponden al área donde, mediante trabajos de investigación más separados (trincheras y sondeos), se ha corroborado la existencia y continuidad de la mineralización, tanto superficialmente como en profundidad. Por último las reservas clasificadas como posibles están relacionadas con la extensión oriental del depósito, cuya cartografía se sigue perfectamente en superficie durante más de 2.5 km, y de la que se han analizado muestras de mano con valores superiores al 70 % de wollastonita y aspecto muy similar a las tomadas en la zona más detalladamente estudiada del yacimiento, pero sobre la que no se han realizado ni trincheras ni sondeos hasta el momento.

Fattah (1994) ya había estimado para el yacimiento unas reservas > 20 Mt, con una riqueza del 35 % y un ratio de 5:1 y Bolger (1998) reconocía unas reservas probadas de 4.5 Mt, 20Mt de probables y 75 Mt de posibles.

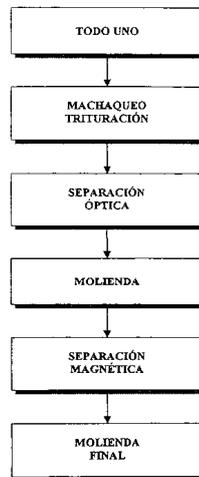


Fig. 44.- Esquema de la planta piloto diseñada (gentileza de *Cía Minera Ilustración, S.A.*)

La *Compañía Minera Ilustración* está, en la actualidad, finalizando los trabajos de instalación de su planta de procesamiento (Fig. 44), para lo cual está evaluando el material con diferentes consumidores mundiales, incluido alguno norteamericano. La planta eventualmente será capaz de producir alrededor de 100.000 t/año de wollastonita, aunque este nivel de producción lo alcanzará gradualmente. Mientras, se ha instalado una planta piloto en el yacimiento para producir material de prueba (Fig. 45).

La principal aplicación del material español es la industria cerámica de la zona mediterránea, y la *Compañía Minera Ilustración* informa que ha tenido una gran acogida entre los potenciales consumidores del sector en la zona. La compañía ha hecho pruebas acerca de los productos más sofisticados derivados de la wollastonita, aunque está intentando que la producción de estos se desarrolle una vez que los productos cerámicos se hagan un hueco firme en el mercado.

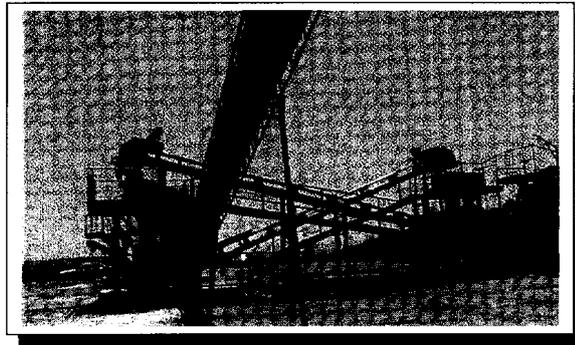


Fig. 45.- Vista de la instalación provisional de tratamiento existente en el yacimiento (Foto *Cía Minera Ilustración, S.A.*)

La *Compañía Minera Ilustración* ha comunicado que la nueva explotación iniciará sus trabajos a finales de 2000 o principios del 2001 y estará en una situación muy ventajosa para competir con la wollastonita para usos cerámicos que actualmente está siendo importado por Europa desde la India o China, pues aún los productores cerámicos europeos siguen quejándose de la calidad del producto de muchos de los embarques del mineral asiático. La *Compañía Minera Ilustración* considera que la alta calidad de su producto, la eficiencia de su procesado y los comparativamente bajos costes del transporte, la sitúan en una buena posición para ocupar una parte importante del mercado europeo.

4.5.- OTROS INDICIOS

Aunque las localidades españolas con una concentración mineral apreciable de wollastonita, susceptibles de haber sufrido explotación en el pasado o sufrirla en el futuro han sido analizadas previamente, existe un número importante de afloramientos, citas y referencias en las que, aunque normalmente sólo se señala su presencia mineralógica, creemos conveniente recogerlas en este trabajo.

La distribución de estos indicios se va a hacer por Comunidades Autónomas.

4.5.1.- ANDALUCÍA

4.5.1.1.- Santa Olalla (Huelva)

En el skarn de magnetita de Santa Olalla se ha citado la presencia de wollastonita (Velasco y Amigó, 1979). En este afloramiento se separan dos tipos diferentes de skarn: magnésicos y cálcicos, apareciendo la wollastonita asociada a estos últimos.

Es posible que este skarn esté relacionado con el que ha producido el yacimiento de Aroche.

4.5.2.- ARAGÓN

4.5.2.1.- Panticosa (Huesca)

Santana et al. (1992) citan, en los bordes del macizo granítico de Panticosa, una banda de metamorfismo de contacto que alcanza las facies de las corneanas hornbléndicas (wollastonita-cordierita).

Igualmente, junto al km 20 de la carretera de Pontios de los Baños (a unos 3.200 m de la salida de Panticosa), se encuentra wollastonita con idocrasa (Mirete Mayo, 1999)³.

4.5.3.- ASTURIAS

4.5.3.1.- Carlés-Salas (Asturias)

Fernández y Blanco (1992) citan, en el skarn de Cu-As-Au de Carlés, la presencia muy minoritaria de wollastonita asociada a fenómenos tardíos.

4.5.4.- CASTILLA Y LEÓN

4.5.4.1.- Fermoselle (Zamora)

En las proximidades de Fermoselle (Zamora) se citan retazos de un potente nivel de mármoles que, puntualmente, están en contacto directo con dos tipos de granito, una granodiorita biotítica y un granito de dos micas de grano medio; originando, en este último caso, un skarn (Franco et al., 1994).

Se han encontrado asociaciones mineralógicas del skarn en zonas próximas al granito de dos micas, donde la roca carbonatada no aflora. Se sitúan en una zona elevada topográficamente, por lo que se les puede considerar prácticamente "in situ"; también se observan formando pequeñas masas en el mármol. Estas asociaciones mineralógicas constituyen agregados llamativos de grano grueso, masivos, prismáticos, aciculares, etc. en los que se distinguen a simple vista: granate, idocrasa, epidota y agujas blancas de wollastonita.

La wollastonita se presenta en las siguientes asociaciones minerales:

- ◆ granate-wollastonita-clinopiroxeno cálcico-tremolita
- ◆ granate-wollastonita-calcita-clinopiroxeno cálcico-esfena

4.5.5.- CATALUÑA

4.5.5.1.- Gualba (Barcelona)

La presencia de wollastonita, en las proximidades de esta localidad barcelonesa, se conocen desde hace décadas. Así, aparece citada por Dana y Hurlbut (1960), Domínguez et al. (1968) y Galán Huertos y Mirete Mayo (op. cit.).

³- Comunicación personal de Mirete Mayo (N.A.)

4.5.5.2.- Nuria (Girona)

La primera cita de wollastonita en esta localidad se debe a Calderón (1910), aunque no hace ninguna descripción de la misma al respecto. Más tarde Galán Huertos y Mirete Mayo (1979), en su "Introducción a los minerales de España", vuelven a citar la presencia de esta localidad.

4.5.5.3.- La Cerdanya (Lleida)

Según Soler y Delgado (1991) existen en La Cerdanya, zona axial del Pirineo Central, diversos tipos de skarns con diferentes grados de mineralización (Fig. 46):

- skarns de wollastonita - idocrasa → estériles
- skarns de wollastonita - idocrasa → mineralizados en W
- skarns de hedenbergita → mineralizados en Au-Ag-Bi-W-As-Pb-Zn
- skarns de pirrotina → mineralizados en Bi-Cu-Bi-As
- skarns de arsenopirita → mineralizados en Au-Ag-Bi- As-Pb-Zn-Cu-Pt-Pd
- skarns de pirrotina - arsenopirita → mineralizados en Sn-Au-Ag-Bi-As-Cu
- skarns de magnetita y hematites

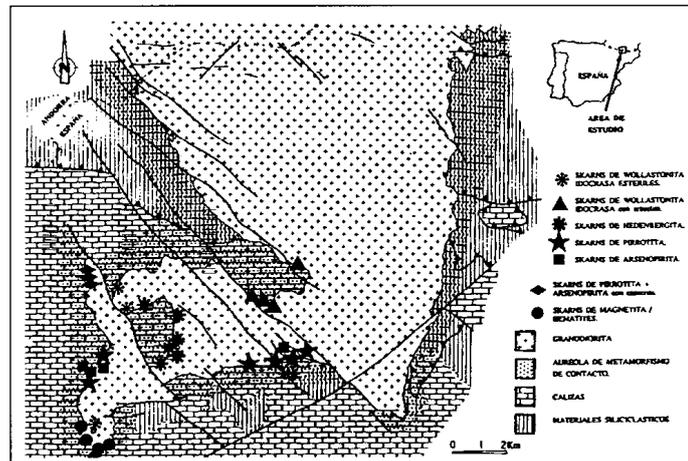


Fig. 46.- Mapa geológico del sector de La Cerdanya (según Soler y Delgado, 1991)

La edad de los materiales afectados evoluciona desde el pre-Caradoc hasta el Carbonífero inferior, siendo su naturaleza preferentemente pelítica, menos los materiales devónicos que constituyen una potente serie carbonatada sobre la que se desarrollan los skarns. La generadora del skarn es una granodiorita biotítica de 275 Ma (Pérmico medio) que intruye en los materiales circundantes, a una presión de 2 Kb y una T ~ 600 °C, generando una aureola de metamorfismo muy bien desarrollada.

Los skarns de wollastonita-idocrasa se ubican sobre el propio contacto intrusivo, entre las calizas devónicas y la granodiorita (Soler et al., 1991). Señalando que, en La Cerdanya, las condiciones de formación de los skarns de wollastonita se encuentran próximas a los 2Kb de presión y a temperaturas superiores a los 550 °C.

Soler y Delgado (op. cit.) destacan el gran desarrollo que, localmente, alcanza la zona de la wollastonita, así como sus posibilidades económicas como roca ornamental.

4.5.6.- COMUNIDAD VALENCIANA

4.5.6.1.- Lugar Nuevo de Fenollet (Valencia)

Martel San Gil (1975) señala, creemos que por primera vez en España, la presencia de wollastonita asociada a fenómenos subvolcánicos. Ello ocurre en el Tozal Negro, una antigua explotación de áridos de la provincia de Valencia (Fig. 47).

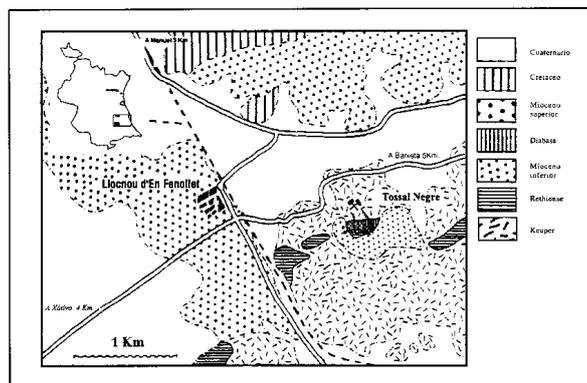


Fig. 47.- Localización y esquema geológico del afloramiento volcánico de Lugar Nuevo de Fenollet (según Casanova y Ochando, 1998)

El mineral se encuentra en unas calizas del Rethiense y la secuencia de formación (Bastida et al., 1987; Lago et al., 1996) ha sido la siguiente (Fig. 48):

- 1º. fracturación de los materiales de la facies Keuper (yesos, dolomías y arcillas) y emisión lávica subacuática, con importante desarrollo de "pillow-lavas".
- 2º. inmediata o simultáneamente a la emisión lávica, se produce una avalancha olistostromica que da lugar a una brecha compleja (bloques de margas, calizas y fragmentos de "pillows").
- 3º. cesa la actividad magmática y continua la sedimentación, principalmente carbonatada.
- 4º. intrusión de una diabasa masiva, formando un "sill" entre el elemento olistostromico en la base y el sedimento carbonatado (todavía sin consolidar) a techo. Debido al efecto térmico originado se produce un metamorfismo de contacto sobre la roca encajante, que principalmente afecta al sedimento carbonatado. Asociado a este magmatismo, también se desarrollan procesos hidrotermales posteriores.

La asociación mineralógica existente es de dos tipos (Casanova y Ochando, 1998):

- la originada, en una primera fase, por efecto del metamorfismo de contacto de la diabasa sobre las facies carbonatadas y que da lugar a: wollastonita-diópsido-grosularia
- la originada, en una segunda fase, por procesos hidrotermales sobre las brechas olistostrómicas que, dadas las cavidades y fracturas existentes en las mismas, han permitido tanto la circulación de fluidos como el crecimiento de grandes cristales, siendo los minerales que aparecen: pirita, hematites, clorita, plagioclasas, etc.

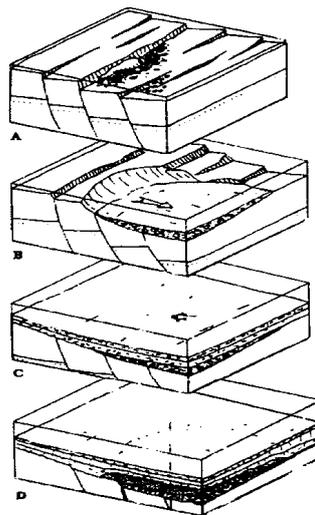


Fig. 48.- Esquema de la evolución geológica del afloramiento, donde se muestran las dos manifestaciones magmáticas (según Casanova y Ochando, op. cit.)

4.5.7.- EXTREMADURA

4.5.7.1.- Peralada de San Román (Cáceres)

La Junta de Extremadura (1994) comunica la existencia de un indicio de wollastonita en las proximidades del A° de Parralejo, en Peralada de San Román. Parece tratarse de unos mármoles dolomíticos brechoides con wollastonita, aunque se desconoce el alcance real del referido indicio.

4.5.8.- MADRID

4.5.8.1.- Puerto de Somosierra (Madrid)

Leguey Jiménez et al. (1976) describen, en el Puerto de Somosierra, un grupo de tres afloramientos calcáreos con mineralogía de skarn explotados en el pasado como canteras de mármol (Fig. 49).

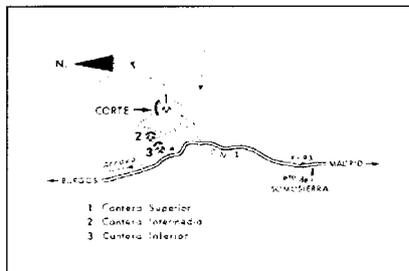


Fig. 49.- Situación de las canteras estudiadas en las proximidades del Puerto de Somosierra (según Leguey Jiménez et al., 1976)

Los autores centran el trabajo en la cantera nº 1, la más superior, por ser la que presenta una mayor continuidad de los materiales. La serie marmórea presenta una dirección N100°E/35-40°S y es desplazada por una falla unos 80 m hacia el N, siendo este último tramo el que fue objeto de explotación en las canteras intermedia e inferior.

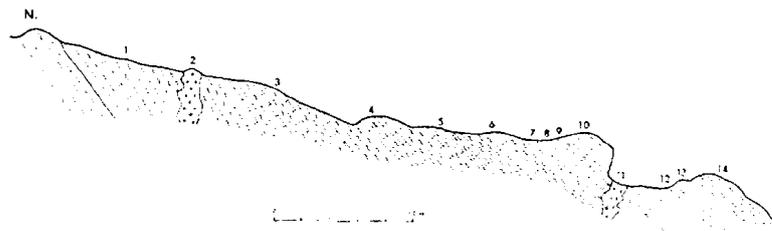


Fig. 50.- Corte geológico de la cantera superior, mostrando las diferentes litologías existentes (según Leguey Jiménez et al., op. cit.)

En la Fig. 50 se observa un corte geológico, en dirección N-S, de la cantera superior, cuya descripción es:

- 1.- 15 m de esquistos y micacitas que están intercalados con unos 0.30 m de mármol pardo-amarillento, muy alterado en superficie
- 2.- 0.50 m de una pegmatita de grano variable, con abundantes cristales de turmalina y marcasita
- 3.- 20 m de micacitas, con intercalaciones aisladas de 8 niveles calcáreos de grano grueso, coloración variable y escasa potencia
- 4.- 2.50 m de micacitas con 3 niveles de mármol blanco, que presentan bandas micáceas

- 5.- 4 m de micacitas con 3 niveles intercalados de mármol negro bandeado, correspondiendo las bandas a zonas micáceas
- 6.- 1.50 m de micacitas con 1 nivel calcáreo de 8 cm de espesor
- 7.- 0.30 m de mármol verde con laminaciones blancas y granate masivo en la base de los niveles
- 8.- 1 m de mármol blanco masivo, de grano grueso, sin granate
- 9.- 0.10 m semejantes a los del nivel 7
- 10.-1.20 m de mármol blanco con granates
- 11.-0.70 m de pegmatitas
- 12.-1.50 m de micacitas
- 13.-0.40 m de mármol blanco con algunos granates. El techo está compuesto por esquistos micáceos y micaesquistos

A la vista de la homogeneidad de los materiales Leguey et al. (1976) separan cuatro unidades, prescindiendo de los primeros niveles debido a su grado de alteración y escasa potencia

1. *Mármol blanco bandeado* (nivel 4, Fig. 50)
Los minerales principales son los carbonatos (dolomita » calcita) y, como minoritarios aparecen, flogopita y tremolita; la cual, a veces, está en proceso de transformación a wollastonita.
2. *Mármol negro bandeado, con zonas micáceas* (nivel 5, Fig. 50)
Los minerales principales son los carbonatos (calcita » dolomita) y, como minoritarios, flogopita, tremolita y antigorita.
3. *Mármol verdoso, con niveles detríticos* (nivel 7 y 9, Fig. 50)
Los minerales principales son los carbonatos (dolomita » calcita) y, como minoritarios, cuarzo, diópsido, plagioclasas y cloritoide.
4. *Mármol blanco con granates* (nivel 10, Fig. 50)
Se caracteriza por la presencia de grandes cristales de granate, cuya distribución es variable; lo que permite diferenciar, a simple vista, tres tipos de texturas que quedan representados en la Fig. 51.

Las unidades diferenciadas en la Fig. 51 son:

A.- *Mármol blanco con fenoblastos de granate*

Esta unidad está constituida, preferentemente, por cristales de dolomita entre los que aparecen agregados de diópsido. Otros minerales abundantes son el granate y la wollastonita. Esta última preferentemente localizada en los bordes irregulares de los granates, aunque también se encuentra dentro de aquellos, en forma de inclusiones aciculares con crecimientos radiados.

El tránsito entre la zona dolomítica y la unidad verdosa siguiente se realiza a través de capas de 2-3 mm de wollastonita, con algunos granos de diópsido y titanita. A veces, entre la franja wollastonítica y la unidad B, aparece una franja granatífera intermitente.

B.- *Mármol de tono verdoso con bandas claras muy marcadas, de composición wollastonítica, y poco granate*

Consta de una matriz criptocristalina (bytownita), dentro de la cual aparecen agregados de diópsido dispuestos, generalmente, en dirección paralela al bandeado existente.

Este mármol pasa, en ocasiones, de modo gradual al anterior, a través de una pequeña banda continua de wollastonita. La distribución de las zonas blanquecinas con wollastonita y granate se localizan, preferentemente, a muro y centro de los estratos, en tanto que las zonas verdosas aparecen a techo.

C.- *Granate masivo, localizado fundamentalmente a techo de las capas*

Predomina una masa de granate con numerosas inclusiones de diópsido, wollastonita, feldespatos, carbonatos y cristales bien formados de idocrasa. El granate presenta dos tipos texturales: uno laminar y otro masivo.

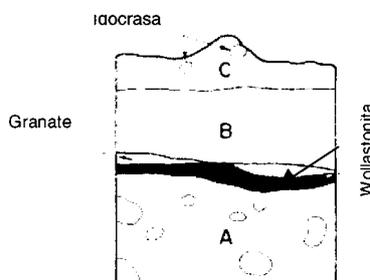


Fig. 51.- Distribución de los minerales en la unidad 4. A: mármol blanco; B: mármol verdoso; C: granate masivo (modificado de Leguey Jiménez et al., op. cit.)

4.5.8.2.- Puerto de Navacerrada (Madrid)

Existen referencias de Sos Baynat⁹ sobre la existencia de wollastonita en el antiguo terreno del destacamento de aviación (a unos 200 m del actual aparcamiento), aunque no ha sido posible localizar dicho indicio.

4.5.8.3.- Villa del Prado (Madrid)

Carandell (1914) describe, en la Sierra de Guadarrama, una serie de grupos de afloramientos calcáreos asociados a fenómenos metamórficos, que de NE a SO son:

- Peñalara-Collado de la Felecha-Carro del Diablo
- Puerto de Malagón-Santa María de la Alameda-Robledo de Chavela
- El Rincón-Villa del Prado
- Casavieja
- Montesclaros

citándose wollastonita únicamente en el afloramiento de Villa del Prado, en compañía de tremolita-granate-grafito-augita, pero con una representación escasa.

⁹- Comunicación personal de Mirete Mayo (N.A.)

El yacimiento calcáreo se encontraba a unos 5 km al norte del pueblo y junto al nacimiento del A° de la Plaza que atraviesa la población y vierte sus aguas al Alberche. Sobre los materiales néisicos del entorno se observaban unos tramos micacíticos, a ambos lados del arroyo, con intercalaciones calcáreas (que habían sufrido actividad extractiva en el pasado) y que presentaban un fuerte buzamiento, dando un aspecto de paredones cuasi verticales (Figs. 52 y 53).

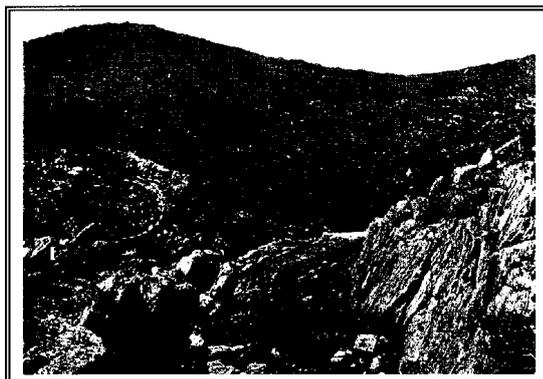


Fig. 52.- Yacimiento de Villa del Prado. Afloramientos I y III a la izquierda y II en primer término (según Carandell, op. cit.)

En uno de los crestones, el explotado en la margen derecha del arroyo (I), todavía afloraba caliza. El otro (II), a mayor altura y a la izquierda del citado cauce, estaba ya totalmente agotado; aunque presentaba señales evidentes de haberse extraído caliza, pues quedaban junto a él restos de un antiguo horno de cal. La distancia entre los afloramientos I y II era de unos 40-50 m.



Fig. 53.- Yacimiento de Villa del Prado. Detalle del afloramiento I (según Carandell, op. cit.)

Aún se cita un tercer afloramiento (III), ya extinguido, junto al afloramiento I.

Las canteras de Villa del Prado ya estaban abandonadas a principios de siglo y, únicamente, aparecía algún bloque aislado de caliza en las proximidades del arroyo. El frente de la cantera era de unos 15 m de longitud y se encontraba a una cota de 700 m.

La caliza era de color blanco y brillo mate, con fractura astillosa. Los minerales asociados eran: granate (grosularita) de hasta 3 cm que se presentaba en forma de nódulos dentro de la caliza, tremolita y wollastonita en cristales finamente aciculares y augita.

4.5.9.- OTROS SKARNS

Aparte de todos estos indicios que se han relacionado previamente, existe toda una serie de skarns (alguno de los cuales ya quedan citados en el trabajo de Carandell, op. cit.), donde teóricamente se dan las condiciones para que aparezca wollastonita, aunque esta aún no haya sido citada (Fig. 54),

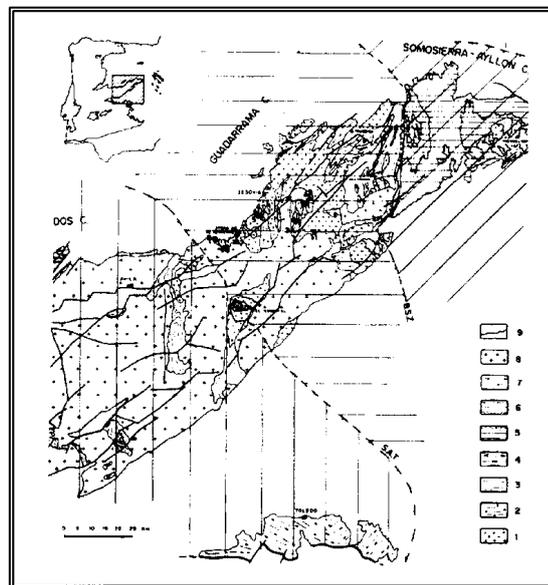


Fig. 54.- Encuadre geológico y situación de los skarns en el Sistema Central Español (según Tornos Arroyo y Casquet Martín, 1986)

Litologías: 1.- Neises glandulares, 2.- Serie Fémica Heterogénea, 3.- Serie Superior, 4.- Ud. Cristalina de Toledo, 5.- Tremadoc, 6.- Arenig a Devónico inf., 7.- Granitoides estructurados, 8.- Granitoides tardihercínicos, 9.- Cobertera posthercínica.

Skarns: 1.- Carro del Diablo / Mg (Sn-W); 2.- Artiñuelo / Ca (W); 3.- Pájaros; 4.- Cotos; 5.- Revenga / Ca (W-Sn-Cu-Zn); 6.- Almadenes; 7.- Hondalizas; 8.- La Cabeza; 9.- El Caloco / Ca (Fe); 10.- La Paradilla; 11.- Valdemartín / Fe-Sn

4.5.9.1.- Macizo de Peñalara (Madrid)

Se citan algunos pequeños ejemplos en la vertiente oriental del macizo de Peñalara. Se trata de reemplazamientos de pequeños lentejones de rocas silicatadas cálcicas intercaladas entre metasedimentos. Consisten, inicialmente, en una asociación de alta temperatura, siendo la paragénesis la adecuada para la wollastonita, pues aparece diópsido-granate (grosularita). La mineralización está compuesta por scheelita y sulfuros muy accesorios (pirrotina, pirita, arsenopirita, calcopirita y löllingita), así como cuarzo, calcita y fluorita (Tornos Arroyo y Casquet Martín, 1986).

4.5.9.2.- Otero de Herreros (Segovia)

Este tipo de skarn (de W-Sn-Cu-Zn) aparece exclusivamente en afloramientos lenticulares ligados al reemplazamiento de mármoles dolomíticos y localmente afectados por fenómenos de cizallamiento dúctil-frágil tardihercínicos. El ejemplo más representativo es el skarn del Cerro de los Almadenes, en Otero de Herreros (Tornos Arroyo y Casquet Martín, 1984), donde la mineralización aparece ligada a un skarn cálcico adyacente a un granito adamellítico variablemente episienitizado (Fig. 55). Ambos están en contacto mediante una banda de cizalla, de dirección NO-SE y buzamiento 45°SO, con componente de movimiento normal.

La mineralización existente, compuesta de esfalerita, scheelita, calcopirita, casiterita, magnetita y sulfosales de Bi-Pb-Ag-Cu principalmente, muestra una morfología lenticular con una potencia máxima de unos 80 m. En los mármoles la alteración metasomática se inicia con anterioridad al juego de la cizalla y consiste en el desarrollo de un zonado metasomático de alta temperatura, mármol-granatita-clinopiroxenita, de tipo complejo. La paragénesis es la adecuada para la wollastonita, pues aparece diópsido-granate (grosularita).

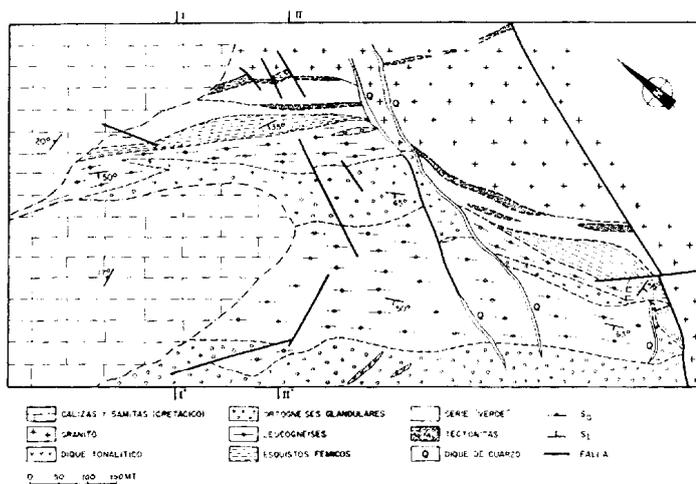


Fig. 55.- Mapa geológico del Cerro de los Almadenes (según Tornos Arroyo y Casquet Martín, 1984)

Parecido al Cerro de los Almadenes, y en su proximidad, existen otros skarns de las mismas características tipológicas y mineralógicas, Revenga y Hondalizas, pero no parecen estar asociados a discontinuidades tectónicas

4.5.9.3.- El Caloco (Segovia)

El skarn férrico de Arroyo Zancado, en el Macizo de El Caloco (Navidad y Villaseca, 1983), sustituye casi totalmente a un cuerpo lenticular de mármoles, rocas básicas y rocas silicatadas cálcicas que está rodeado de esquistos y neises glandulares, todo ello afectado fuertemente por una cizalla hercínica sincrónica con la F₂.

Este skarn muestra dos etapas evolutivas. En una primera fase de skarnificación aparece granate y diópsido (sin wollastonita), siendo reemplazada por una segunda fase donde se generan: andradita, idocrasa, hornblenda y epidota como ganga de la mineralización de magnetita y calcopirita accesoria.

4.5.9.4.- San Salvador de Cantamuda (Palencia)

El skarn de Carracedo se encuentra a unos 12 km al norte de Cervera de Pisuerga, en las proximidades de la localidad de San Salvador de Cantamuda, en la región de La Pernía (N de la provincia de Palencia). La mina se halla en el borde occidental de la hoja nº 107 (Barruelo de Santullán), del MTN a escala 1:50.000.

Los accesos a la mina se realizan por la C^a. de Cervera de Pisuerga a Potes. En el km 118,200 se desvía uno en dirección a Polentinos y, nada más cruzar el puente sobre el pantano de Vañes, se toma el primer camino que sale a la derecha (Fig. 56).

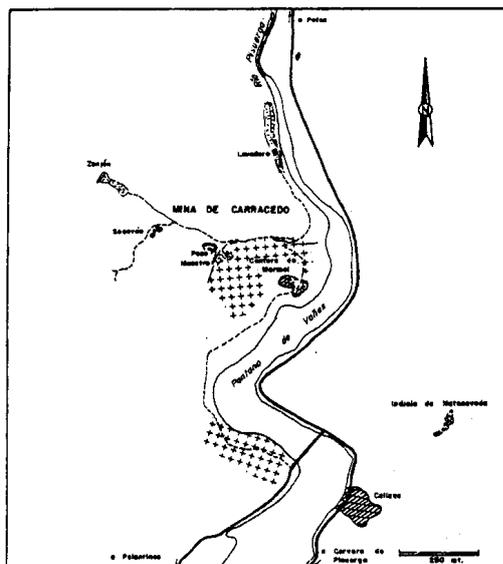


Fig. 56.- Esquema de situación de las labores mineras de la mina de Carracedo (según Martín Izard et al., 1986)

El área se enmarca en la denominada Región Palentina, dentro de las divisiones existentes de la Cordillera Cantábrica (Martínez García, 1981). Los materiales de la región están constituidos por sedimentos paleozoicos pelítico-carbonatados, de edad Ordovícico-Silúrico a Carbonífero, que finalizan con una formación transgresiva, denominada Brañosa (Cantabriense superior), que es el encajante de la mineralización (Fig. 57). Estas rocas poseen un carácter turbidítico y consisten esencialmente en lutitas que tienen a muro un pequeño nivel calizo.

Las formaciones sedimentarias están atravesadas por cuerpos intrusivos de tipo cuarzdiorítico, los cuales, en el contacto con las rocas carbonatadas, dan lugar a un skarn formado por mármoles y cornubianitas. Estas últimas pueden ser granatífero-anfibólicas o piroxénico-anfibólicas; además, las rocas encajantes de la mineralización están afectadas por fenómenos de epidotización, carbonatización, cloritización, sericitización y silicificación. El proceso metamórfico de contacto ha dado lugar a un yacimiento pirometasomático por difusión y reemplazamiento en la fase neumatolítico-catatermal, en los que se ha beneficiado: calcopirita, mispiquel y magnetita y, ocasionalmente, esfalerita, cobres grises, pirrotina y löllingita (Martín Izard et al., 1986). Como minerales de metamorfismo aparecen granate y diópsido, aunque no se cita a la wollastonita.

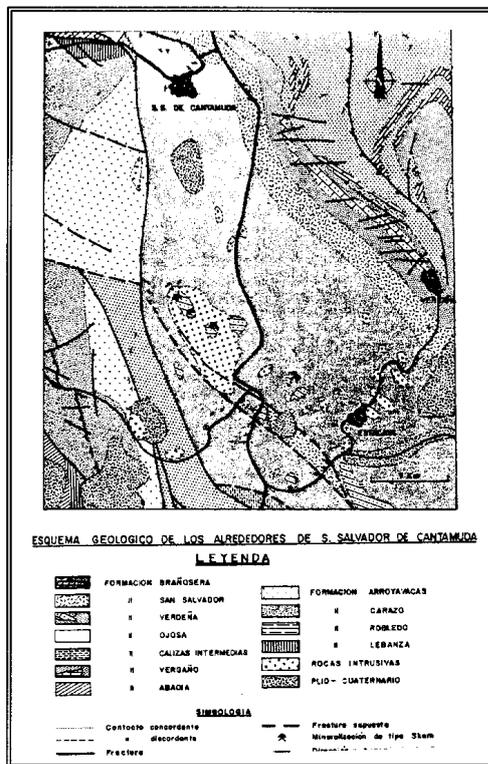


Fig. 57.- Mapa geológico del área de San Salvador de Cantamuda (según Martín Izard et al., op. cit.)

5.- EXPLORACIÓN Y EVALUACIÓN DE YACIMIENTOS

La exploración de yacimientos comerciales de wollastonita se inicia con la definición de los parámetros a alcanzar. Estos parámetros incluyen: localización, mineralogía y reservas mínimas. El siguiente paso es desarrollar un plan de exploración que debe incluir: investigación de depósitos conocidos, distritos mineros y/o otras áreas que tuviesen un entorno geológico adecuado para la formación de wollastonita. Factores geológicos favorables pueden ser intrusiones ígneas, tales como anortositas y sienitas, en un macizo metamórfico precámbrico, siempre que contenga rocas calco-silicatadas, como ocurre en Nueva York, Canadá y Finlandia; o la intrusión de granitos jurásicos o cretácicos en materiales metamórficos paleozoicos, donde existan rocas calco-silicatadas, como en la parte occidental de EE.UU y Méjico.

Una vez que los objetivos de la exploración han sido establecidos, se necesita un reconocimiento geológico inicial de las áreas seleccionadas, o **1ª Fase de Exploración**, que podría constar de:

- ~ recorridos previos de campo, diseñados en función de la cartografía geológica existente
- ~ cartografía geológica, a escala 1:50.000 o 1:25.000, de las diferentes unidades, utilizando foto aérea
- ~ muestreo geoquímico de sedimento de arroyos (para detectar el granate y el diópsido asociado)
- ~ muestreo geoquímico por draga y/o de canal
- ~ análisis mineralógico, físico y químico de muestras de campo

Las técnicas geofísicas se utilizan raramente, pues las rocas con wollastonita no producen anomalías gravimétricas, eléctricas o magnéticas.

En algunas áreas, tales como en los yacimientos de Fox Knoll, Lewis, Oak Hill y Deerhead, la roca rica en wollastonita no aflora, generalmente. Esto se debe, parcialmente, a su baja resistencia a la meteorización atmosférica en climas húmedos, lo que puede representar un problema en las primeras etapas de la exploración. En tales zonas deben tenerse en cuenta ciertos factores geomorfológicos para localizar los niveles wollastoníticos. La wollastonita, que es de grano muy grueso, puede quedar al descubierto tras largos períodos de meteorización química. Sin embargo la wollastonita es, generalmente, más resistente a la meteorización en climas áridos, tal como ocurre en ciertas partes de Méjico y en el occidente de los EE.UU.

Después de que los indicios han sido identificados se lleva a cabo una exploración geológica más detallada, o **2ª Fase de Exploración**, que podría constar de:

- ~ cartografía geológica de detalle a escala 1:10.000 o 1:5.000
- ~ realización de sondeos mecánicos con recuperación de testigo
- ~ apertura de calicatas y muestreo de las mismas
- ~ análisis de las muestras
 - difracción de rayos X (para análisis mineralógico)
 - fluorescencia de rayos X (para análisis químico)
- ~ estudios petrográficos sobre lámina delgada, de diferentes muestras seleccionadas
- ~ determinación del ratio, PPC y brillo

Si en esta fase se alcanzan resultados favorables, es necesario extraer entonces una muestra en bruto representativa del yacimiento, y someterla a una serie de ensayos para determinar si se pueden obtener productos de interés comercial, se trata de la **3ª Fase de Exploración**:

- ~ basándose en los resultados analíticos la muestra puede ser beneficiada por vía húmeda o vía seca, mediante métodos a escala de laboratorio, para mejorar la calidad del material y ajustarla a las

especificaciones comerciales tras eliminar la ganga. Los pasos que pueden seguirse, dependiendo si se utiliza la vía seca o la húmeda son:

- clasificación manual
- machaqueo
- clasificación
- pulverización mediante molinos de bolas
- flotación
- separación magnética de alta intensidad
- espesamiento
- filtración
- secado
- pulverización mediante molinos de bolas
- ~ los productos resultantes de los ensayos de beneficiación son de nuevo sometidos a los mismos análisis que las muestras de los testigos de sondeo:
 - difracción de rayos X
 - fluorescencia de rayos X
 - estudios petrográficos, sobre lámina delgada, de diferentes muestras seleccionadas
 - determinación del ratio, PPC y brillo
- ~ tras superar las anteriores pruebas, los productos resultantes se someten a:
 - cálculo del área superficial
 - densidad en bruto
 - absorción de aceite
 - distribución de tamaño de partículas
 - fotografías de Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) de cada uno de los productos

6.- MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN

La wollastonita se explota tanto por minería a cielo abierto (el método más extendido) como por interior, en función de las características del yacimiento. Cuando el yacimiento aflora o está a poca profundidad el mejor método es el cielo abierto, necesitándose además menores contenidos de mineral (< 25 %); mientras que en el caso de la minería subterránea, se necesitan leyes más altas (~ 60 %) para paliar el aumento de costo de la explotación.

Es muy corriente que explotaciones que se han iniciado con un método con el tiempo hayan evolucionado al otro o, inclusive, que se mantengan en zonas distintas del yacimiento métodos diferentes.

Desde 1943 hasta 1982 la compañía *NYCO Minerals Inc.* explotó el yacimiento de Fox Knoll (cerca de Willsboro). La extracción inicialmente se hizo a cielo abierto y posteriormente por interior, pero el agotamiento de sus reservas trajo consigo el cierre de la mina subterránea en diciembre de 1982 y el subsecuente desarrollo del yacimiento de Lewis, actualmente en producción, con unas reservas estimadas de 6 Mt. En la actualidad la explotación de Lewis, con 700 t/día de extracción de un "todo-uno" con el 60 % de wollastonita y el 40 % de granate e impurezas, se extrae de los bancos de exterior.

El segundo yacimiento de los EE.UU. por importancia, propiedad de *R.T. Vanderbilt*, se encuentra en Harrisville (norte del estado de Nueva York). Se inició el aprovechamiento del yacimiento a finales de 1977, utilizándose conjuntamente la explotación a cielo abierto y la de interior. La wollastonita se extrae, junto con el talco, de una zona de unas 930 ha de superficie.

En China tenemos el yacimiento de Dadingshan (constituido por los depósitos de Meiyaoshan y Tiengongshan), que se mina únicamente a cielo abierto. Consta de varias zonas mineralizadas en mármol y contiene un 60-90 % de wollastonita asociada con calcita, agregados silíceos y, en menor proporción, granate y diópsido.

La caliza del yacimiento de Lappeenranta (Finlandia) se explotó a principios de siglo para la extracción de cal, como materia prima para la fabricación del cemento, no siendo hasta 1957 cuando empezó a explotarse la wollastonita. La wollastonita es minada, junto con la caliza, a cielo abierto; iniciándose la explotación original del yacimiento con explosivo, posteriormente machaqueo y, finalmente, selección manual de la wollastonita, caliza y ganga.

El yacimiento de Belkappahar (estado de Rajasthan, India) es explotado por *Wolkem* mediante minería a cielo abierto, estando las explotaciones semimecanizadas y empleándose en ellas a más de 2.000 trabajadores. El yacimiento presenta unas reservas probadas de unas 50 Mt y unas reservas probables estimadas de 200 Mt. *Wolkem* ha recorrido un largo camino desde sus inicios en los 70, pasando de las modestas 2.748 t/año extraídas en 1973 hasta las 80.000 t/año de 1997.

En Méjico, *General de Minerales, S.A.*, produce wollastonita en dos minas a cielo abierto ubicadas en Santa Fe y Pánfilo Natura, a 50 o 60 km de Guadalupe (estado de Zacatecas). La wollastonita aparece en niveles delgados que buzan hasta un máximo de 50° y está asociada con calcita, cuarzo, granate y diópsido. La producción es próxima a las 20.000 t/año y se utiliza, preferentemente, en la industria cerámica.

Durante casi 30 años (hasta 1989) *Wollastonita de México, S.A* explotó una mina a cielo abierto, situada entre los pueblos de El Saucito y Noria del Cerro (estado de Zacatecas), con unas reservas estimadas de 40 Mt de mineral de buena calidad (Andrews, 1970).

7.- PROCESADO

La mineralogía de un yacimiento de wollastonita es el principal determinante de la capacidad para producir un concentrado de alta pureza, y se trata de un dato fundamental durante la evaluación de un indicio. Idealmente, un sistema de procesamiento de un yacimiento debería ser capaz de recuperar un concentrado de, por lo menos, el 97 % si no el 99 % de wollastonita. Los factores importantes, mineralógicamente hablando, son: tipos de minerales que constituyen la ganga, tamaño de grano y tamaño de intercrecimiento de los granos constituyentes de los minerales.

Los yacimientos de wollastonita contienen generalmente granate y diópsido que, al no ser de color blanco, tienen que ser eliminados del producto final. Ambos minerales son ligeramente magnéticos y pueden ser separados de la wollastonita mediante separadores magnéticos de alta intensidad.

Sin embargo, la ausencia de granate en el yacimiento de *R.T. Vanderbilt* excluye la utilización de los métodos de separación magnética en seco, que son relativamente baratos. En cambio utiliza técnicas tradicionales de molturación mediante molinos de bolas, para producir un ratio bajo o variedades en polvo que se utilizan en cerámica y metalurgia.

El procesamiento de la wollastonita puede acometerse por vía seca o húmeda. En la Fig. 58 se observa el diagrama del proceso empleado por *NYCO* en su explotación de Willsboro.

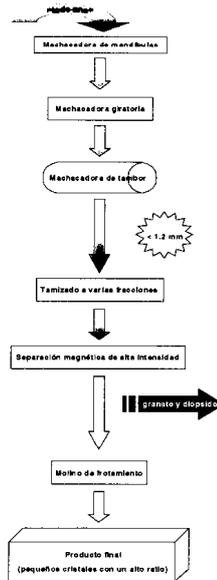


Fig. 58.- Esquema de procesamiento de la planta de *NYCO* en Willsboro

La wollastonita se encuentra asociada a menudo con grandes cantidades de carbonato cálcico que, en algunas aplicaciones como los plásticos, deben ser eliminadas por vía húmeda, generalmente mediante flotación por espuma. En Lappeenranta (Finlandia), después del primer machaqueo, se separa la wollastonita de la caliza y del resto de la ganga mediante métodos fotométricos. La fracción "aceptada" de wollastonita es de nuevo machacada y triturada a 200 μm y después tratada mediante flotación inversa; con ello se separa la calcita, y la wollastonita resultante es beneficiada mediante separación magnética de alta intensidad en vía húmeda, con la que se eliminan los óxidos de hierro. El procesado final implica filtrado, secado y molienda con bolas hasta llegar a un tamaño de producto deseado (Andrews, 1993), obteniéndose cerca de 1 t de wollastonita por cada 3 t de carbonato cálcico.

Para que un yacimiento pueda suministrar a todos los mercados debe obtener un producto con calidad, de alto ratio y molido (en polvo), ya que es muy importante el tamaño de partícula a la que pueden producirse calidades de alto ratio. Por ejemplo, las partículas de wollastonita que tengan un ratio 10:1 y dimensiones de 20 x 2 μm , no se utilizan en las mismas aplicaciones que aquellas que tienen 200 x 20 μm . Los finos deben ser eliminados de los productos de alto ratio, para asegurar su óptimo funcionamiento como carga de refuerzo.

Las pautas para el perfeccionamiento del proceso de desarrollo de un nuevo producto quedan recogidas a continuación:

- Productos con alto ratio y tamaño de partícula fina para su utilización como refuerzos, en competencia con la fibra de vidrio molida de tamaño de partícula fina (4.5 μm), u otras fibras sintéticas.
- Productos con un tamaño de partícula fina, con un tamaño máximo de 3-5 μm , para su utilización en aplicaciones electrónicas.
- Modificaciones químicas diversas que den a la wollastonita de partícula fina una ventaja importante sobre las fibras cortas, respecto a la apariencia superficial en el caso de los compuestos polímeros, a la resistencia al impacto y a otras propiedades mecánicas.

En el Cap. 8, al analizar los principales productores mundiales, se describirán detenidamente distintos métodos de procesado; no obstante, a continuación se mostrarán algunos esquemas de procesados de distintos yacimiento (Figs 59 y 60).

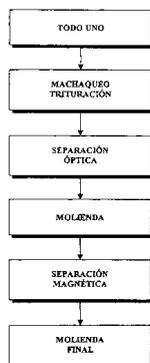


Fig. 59.- Esquema de la planta piloto diseñada para la explotación de Aldea del Obispo, Salamanca (gentileza de *Cia Minera Ilustración, S.A.*)

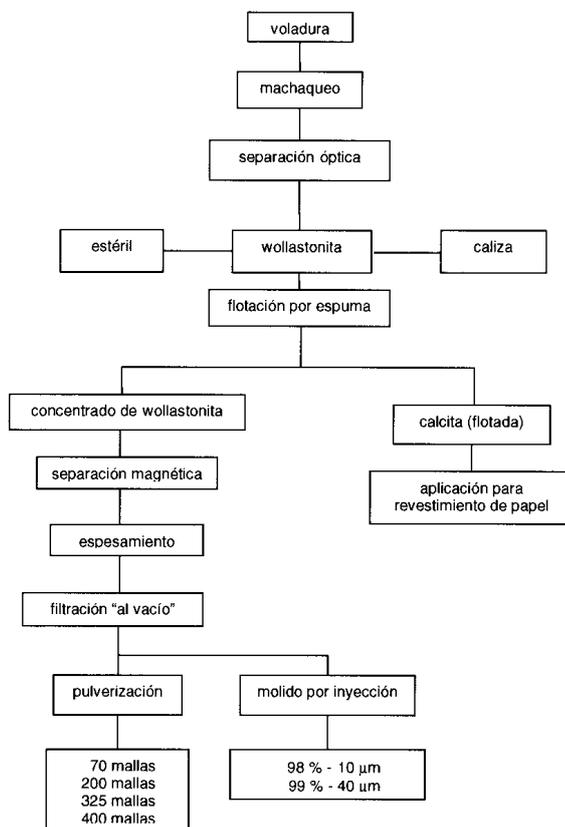


Fig. 60.- Diagrama del procesado de wollastonita de *Partek* en Lappeenranta (según Power, 1986)

8.- SUBPRODUCTOS Y PRODUCTOS DERIVADOS

Un aspecto del desarrollo de un yacimiento mineral, a menudo problemático, es el de la venta de los subproductos y los productos derivados.

En ciertas explotaciones, la propia wollastonita es un producto derivado. Así en la explotación de *Partek* (Lappeenranta, Finlandia), la wollastonita fue encontrada en la zona central de un yacimiento de caliza, que era el material explotado. *Partek* ha transformado a su wollastonita, de un material inicialmente estéril, en un mineral derivado de los de mayor calidad del mundo.

Otro ejemplo es el de *NYCO Minerals Inc.* (Willsboro, Nueva York) que ha obtenido granate y diópsido como subproductos durante años. Sin embargo, solo recientemente, una combinación de tecnología y ensayos sanitarios han elevado este material, considerado hasta entonces como estéril, al nivel de un subproducto útil.

Desde el punto de vista tecnológico, antiguamente era imposible recuperar un concentrado magnético puro de granate-diópsido en los yacimientos del condado de Essex. La instalación reciente de separadores magnéticos permanentes, con un alto grado de eficacia, ha permitido la obtención de concentrados de granate-diópsido con más del 99 % de riqueza. Este concentrado de alta calidad está incrementando su demanda a causa de la naturaleza tóxica o de riesgo de los productos alternativos. Por ejemplo, en el campo de la limpieza por chorro de arena, la arena silícea está perdiendo posiciones a causa del riesgo de silicosis asociado con su utilización. De la misma forma, en el caso de las escorias del procesado de carbón y de fundiciones se conoce su contenido en metales pesados y su peligrosidad por causar serios desordenes neurológicos, si las exposiciones a ellos son altas. El granate, que ni es tóxico, ni presenta ningún riesgo y además posee un valor económico, es el sustituto ideal para estas aplicaciones.

Una de las principales aplicaciones del subproducto de *NYCO*, granate-diópsido, es su utilización como medio filtrante en los procesos de filtrado de agua. En este uso el relativamente alto peso específico del granate, contribuye a dar una excelente estabilidad al lecho filtrante cuando está embebido en agua. Adicionalmente los concentrados de tamaño similar tienen un coeficiente alto de uniformidad, lo que facilita el diseño y la ingeniería de las capas filtrantes, para obtener un flujo óptimo del fluido.

En otros yacimientos de wollastonita, a lo largo del mundo, la obtención de subproductos o productos derivados es menos importante. La wollastonita, frecuentemente, se encuentra asociada con calcita que es recuperada como subproducto por algunos productores, utilizándola como fuente de cal para su uso en agricultura.

9.- PRODUCCIÓN MUNDIAL Y PRINCIPALES PAÍSES PRODUCTORES

La producción de wollastonita a gran escala no se materializa realmente hasta los años 50, con el descubrimiento de yacimientos de alta calidad en las proximidades de Willsboro (estado de Nueva York). Esta zona de explotación, propiedad de *NYCO Minerals Inc.*, se ha mantenido a lo largo de los años y, junto con el yacimiento próximo de Harrisville de *R.T. Vanderbilt Co. Inc.*, permitieron a los EE.UU. acaparar, casi totalmente, la producción de wollastonita en los primeros tiempos. No obstante, la característica más notable de la evolución de la industria de la wollastonita ha sido la diversificación de las fuentes de suministro, a costa del dominio de EE.UU.

El balance geoestratégico de la industria de la wollastonita, durante las últimas décadas, ha oscilado a ambos lados del Océano Pacífico. Hasta los 70, la mayoría de la wollastonita empleada en el mundo era de los EE.UU. Sin embargo, a mediados de los 80, la participación norteamericana en la producción ha descendido desde un 85 % a un 50 %, mayoritariamente como resultado del incremento de la producción en países como la China o India.

Desde 1974, cuando EE.UU. controlaba el 85 % de la producción mundial, el porcentaje relativo de su participación fue disminuyendo en beneficio de otros países como la India, Méjico y Finlandia que incrementaron su participación. Los primeros dos países habían tenido cifras muy erráticas, pero posteriormente han tendido a nivelarse alrededor de las 10.000-15.000 t/año. Finlandia ha doblado su capacidad llegando a las 20.000 t/año. El gráfico representado en la Fig. 61 ilustra más claramente la distribución de los principales países productores.

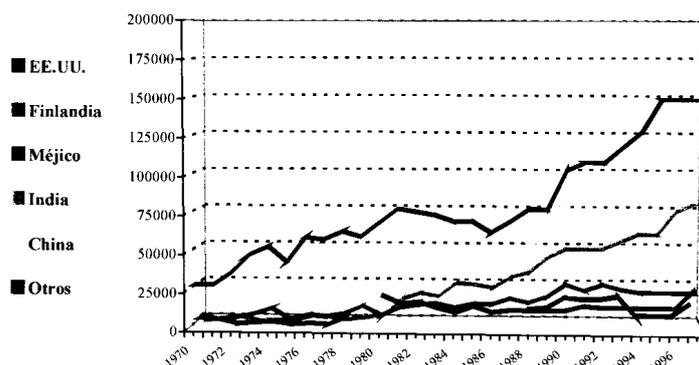


Fig. 61.- Evolución de la producción de los principales productores mundiales (modificado de Power, 1986; ITGE, 1990 y 1991a; Harben, 1999)

En 1983 la producción total de wollastonita alcanzó las 125.000 t, pero esta cifra no incluía los datos de la URSS, China y de algunos pequeños yacimientos de diferentes países (Namibia, Nueva Zelanda y Japón); representando la producción de EE.UU. un 60 % del total mundial (76.000 t).

En 1986, la participación de EE.UU. había descendido al 52 % de la misma (75.000 t), debido a la presencia de India, Finlandia y, con mayor importancia, China que ya contaba con un 9 % del mercado

(13.000 t). Unos años más tarde, en 1993, la cuota de mercado de EE.UU. se redujo hasta el 34 % (120.000 t), mientras que la de China aumentaba hasta el 33 % (117.000 t).

Sin embargo, junto con estos cambios significativos en la repartición de las cuotas de mercado, también se ha producido un incremento en el volumen de wollastonita producida y consumida en el mundo. La producción, entre 1986 y 1993 pasó de 140.000 t/año a más de 310.000 t/año respectivamente.

A principios de los 90 China produjo una tercera parte de la wollastonita mundial, los EE.UU. otra tercera parte y la mayoría del resto se produjo en la India y Finlandia. Pequeñas cantidades se produjeron en Chile, Méjico, República de Sudáfrica, Turquía, Pakistán y Corea del Norte, pero en la mayoría de los casos éstas cantidades sólo eran para consumo de mercados locales.

En 1996 la producción de EE.UU. (38,5 % de la producción mundial), China (32 %) y la India (19 %) representa el 90 % de la producción mundial de wollastonita y, virtualmente, la totalidad de las categorías HAR (de alto ratio) producidas. Más tarde, en 1997, por primera vez China (170.000 t) obtiene una mayor producción que los EE.UU. (150.000 t), alcanzando la producción mundial las 460.000 t (Tabla 7).

No obstante, el inicio de dos nuevas explotaciones de wollastonita en los últimos 18 meses, ha producido un nuevo movimiento pendular alrededor del Pacífico, desde China a los EE.UU., donde existe actualmente una capacidad de casi 400.000 t/año.

AÑOS	EE.UU.	China	INDIA	FINLANDIA	MÉJICO	OTROS (*)	TOTAL
1988	80.000	50.000	35.000	18.000	10.000	6.000	199.000
1989	80.000	60.000	45.000	22.000	10.000	7.000	224.000
1990	105.000	80.000	50.000	30.000	11.000	14.000	290.000
1991	110.000	80.000	50.000	26.000	14.000	13.000	293.000
1992	110.000	80.000	50.000	30.000	13.000	13.000	296.000
1993	120.000	80.000	55.000	27.000	13.000	15.000	310.000
1994	130.000	95.000	60.000	25.000	13.000	2.000	325.000
1995	150.000	120.000	60.000	25.000	13.000	2.000	370.000
1996	150.000	125.000	75.000	25.000	13.000	2.000	390.000
1997	150.000	170.000	80.000	25.000	25.000	10.000	460.000

(*) Chile, República de Chequia, Kenya, Namibia, Pakistán, República de Sudáfrica y Turquía
Fuente: Modificado de Harben (1999)

De las 700.000 t/año estimadas de capacidad mundial, la mayoría se reparten entre los EE.UU. y China, con un contenido próximo al 75 % de las 500.000-600.000 t/año que están siendo producidas actualmente (Bolger, 1998).

A continuación se va a hacer una evaluación completa de todos los países que tienen o han tenido actividad productiva en el mundo. Pero, para facilitar el conocimiento de quienes son los principales productores mundiales, se ha realizado un a síntesis de los mismos en la Tabla 8, en la que se recogen por orden alfabético: los países que tienen actividad productiva, las compañías que explotan yacimientos de wollastonita, localización de la mina y/o de la planta, la capacidad de producción de cada una de ellas y, allí donde se conoce, las principales aplicaciones que se dan al producto final tras haber sido beneficiado.

Tabla 8. Principales productores mundiales de wollastonita

País / Compañía	Mina / Planta	Capacidad (t/año) / Principales aplicaciones
CHINA		
<i>Lishu Wollastonite Mining Corp.</i>	Jilin	80.000 /
<i>Sanyi Mining Development Co. Ltd.</i>	Liaoning	60.000 (producción 40.000) /
<i>Panshi Jianye Non-Metal Group Corp.</i>	Jilin	35.000 /
<i>Tiefa Wollastonite Mining Corp.</i>	Liaoning	35.000 /
<i>Zhejiang Changxing Wollastonite Mine</i>	Zhejiang	25.000 /
<i>Faku Wollastonite Mine</i>	Liaoning	20.000 /
<i>Liaoning Jiangping Fushan Wollastonite Mine</i>	Liaoning	(producción 15.000) / pellets y polvo
<i>Hubei Huangshi Xinya Mining Co.</i>	Hubei	10.000 / polvo acicular
<i>Jiangxi Shanggao Wollastonite Co.</i>	Jiangxi	sin datos / baldosas cerámicas
EE.UU.		
<i>NYCO Minerals Inc.</i>	Willsboro, Nueva York	150.000 / plásticos y la mayoría de las otras aplicaciones
<i>R.T. Vanderbilt Co. Inc.</i>	Gouverneur, Nueva York	40.000 / pinturas, cerámica y plásticos
FINLANDIA		
<i>Partek Industrial Minerals</i>	Lappeenranta	23.000 / producción cerámica
INDIA		
<i>Wolkem India Ltd</i>	Belkappahar, Sirohi y Kura (distrito de Udaipur)	80.000 / baldosas cerámicas, vidriados, sanitarios, revestimientos de frenos e industria metalúrgica
MÉJICO		
<i>Minera NYCO, S.A. de C.V.</i>	Hermosillo	240.000 / cerámica, revestimientos, cemento, sector metalúrgico y del tablero
<i>General de Minerales, S.A. (Geminsa)</i>	Santa Fe y Pánfilo Natera	20.000 / cerámica (baldosas blancas, rojas y vidriadas) y metalurgia
<i>Minerales y Maquilas del Norte, S.A. de C.V.</i>	La Blanca	15.000 / cerámica

Fuente: Modificado de Bolger (1998)

De cara a tener un índice de comparación sobre las diferentes características de los productos generados en los principales países productores, en la Tabla 9 se comparan los análisis químicos de wollastonitas producidas en Estados Unidos, China, India y Finlandia.

Tabla 9. Composición de la wollastonita natural (%)

	ESTADOS UNIDOS		CHINA	INDIA	FINLANDIA
	<i>NYCO</i>	<i>R.T. Vanderbilt</i>	<i>Anhul</i>	<i>Wolkem</i>	<i>Partek</i>
CaO	47.50	44.04	46.10	47.04	43.50
SiO ₂	51.00	50.50	50.59	49.52	53.00
Fe ₂ O ₃	0.40	0.26	0.38	0.43	< 0.25
MgO	0.10	1.48	1.03	0.20	< 0.80
Al ₂ O ₃	0.20	1.75	0.33	0.60	< 1.00
TiO ₂	0.02	sin datos	sin datos	trazas	sin datos
PPC	sin datos	2.18	1.30	1.68	6.16

Fuente: Modificado de Harben & Kuzvart (1996)

9.1.- ESTADOS UNIDOS (EE.UU.)

La producción comercial se limita actualmente al estado de Nueva York, donde trabajan dos compañías: *NYCO* y *R.T. Vanderbilt*. La explotación de *NYCO* está cerca del Lago Champlain, mientras que la de *Vanderbilt* está a unos 160 km al oeste, en el distrito de Gouverneur.

9.1.1.- *NYCO MINERALS INC.*

NYCO Minerals Inc. es una empresa subsidiaria de *Fording Coal Holdings Inc.*, división de *Canadian Pacific Ltd.* *NYCO* es, con diferencia, la principal productora individual de wollastonita del mundo, con una producción que oscila entre las 70.000-100.000 t/año.

En el yacimiento de Lewis se utilizó inicialmente una planta portátil de machaqueo con una capacidad de 295 t/h, transportándose el mineral machacado resultante a la planta situada en Willsboro, para su posterior tratamiento y almacenado. Por motivos medioambientales la dirección del Parque de las Montañas de Adirondack, donde se encuentra el yacimiento, limitó a *NYCO* el transporte de camiones, durante los meses de verano, a un máximo de 25 camiones/día (Fig. 62).

En 1989 se le estimaron, a este yacimiento, unas reservas de 3.2 Mt, con una riqueza del 49 % en wollastonita. Mientras, en el yacimiento cercano de Oak Hill propiedad también de *NYCO*, se detectaron unas reservas subterráneas aprovechables de 5.7 Mt, con un 45 % de riqueza en wollastonita.

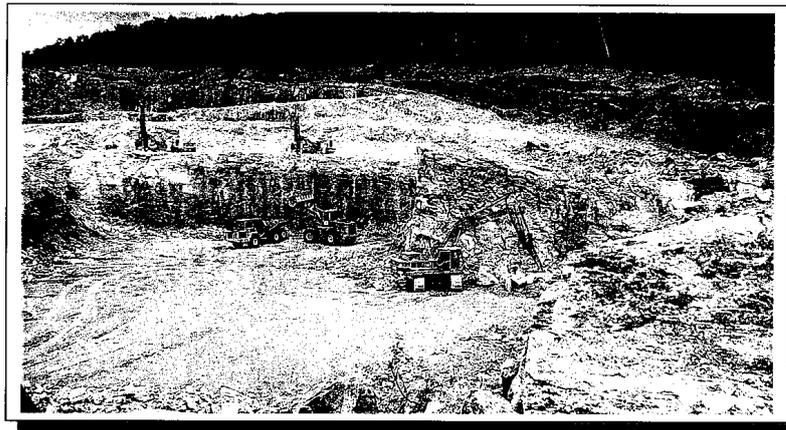


Fig. 62.- Vista de la mina Lewis (Nueva York), propiedad de *NYCO* (según Bolger, 1998)

Durante los últimos años de la década de los 80, en la planta de Willsboro, el mineral machacado se sometía a una nueva molienda para conseguir un producto con un tamaño de 16 mallas. Este material era tamizado a varias fracciones y pasado a través de separadores magnéticos para facilitar la eliminación del granate, el cual encontraba mercados en alza para su empleo como arena de rodadura y para el tratamiento de carreteras. Las diversas fracciones de wollastonita eran entonces mezcladas y de nuevo molturadas mediante un molino de bolas. Del anterior proceso obtenía un producto pulverulento, con ratios del orden de 5:1-10:1 y un tamaño de grano de 325, 400, 475 y 1.250 mallas. Sin embargo, mientras estos tipos de material se suministraban a los mercados tradicionales de la cerámica y las cargas,

NYCO estaba orientando su principal objetivo de mercado en las aplicaciones de fibra larga, tales como el reemplazamiento de asbestos y las cargas funcionales de plásticos y resinas.

A través de técnicas especiales de molienda (pulverización) el material del yacimiento de Lewis conseguía ratios de 15:1 y 20:1, una característica que hacía de la wollastonita de NYCO única, comparada con otros productos similares del mercado. Para conseguir suministrar material de 400 y 1.250 mallas al mercado de fibra larga, la empresa investigó sobre la posibilidad del revestimiento químico para hacerle más atractivo este material al mercado de cargas de plástico o de resinas.

En 1993 la compañía alcanzó las 80.000 t, mediante un programa de expansión y modernización que le costó 14 M\$; incrementando, en 1991, un 50 % la capacidad de la planta que alcanza en la actualidad 150.000 t/año. La inversión también se empleó para desarrollar una nueva mina de 100.000 t/año, próxima a Oak Hill, la cual será una fuente de apoyo para la producción de wollastonita (Fattah, 1994).

Mientras, NYCO continuó aumentando su presencia en el mercado, desarrollando nuevos productos que le permitiesen acceder a nuevos clientes. Últimamente, está planificando la vuelta a los mercados cerámicos, tras un lapsus de 10 años. Durante 1996 NYCO decidió aumentar la producción de su mina de Willsboro a 100.000 t.c.¹⁰/año y, con la ayuda de la nueva mina de Hermosillo (Méjico), aumentó su producción aún más ese mismo año; alcanzando ya, en 1998, una cifra de 150.000 t/año.

La sorprendente adquisición, en enero de 1994, del yacimiento de Hermosillo (Méjico) de 30 Mt, operación realizada a través de *Fording Coal*, fue la llave que utilizó la empresa para entrar de nuevo en los mercados cerámicos. A mediados de los 80, la empresa se retiró de los principales mercados cerámicos por miedo a agotar el yacimiento de alta calidad de Willsboro en mercados de relativo bajo valor; como resultado de ello, NYCO se desinteresó por la industria cerámica y se volcó en la producción de wollastonita de alto ratio, tanto tratada como sin tratar.

Tabla 10. Composición química de la wollastonita comercial de NYCO (%)

	Nueva York (EE.UU)	Hermosillo (MÉJICO)
CaO	47.50	46.10
SiO ₂	51.00	51.45
Fe ₂ O ₃	0.40	0.25
Al ₂ O ₃	0.20	0.66
MnO	0.10	0.05
MgO	0.10	0.50
TiO ₂	0.02	0.02
K ₂ O	-	0.32
PPC (1000 °C)	0.68	0.65

Aunque ambas explotaciones son capaces de producir una gran oferta de productos, el yacimiento de Nueva York puede centrarse ahora en producir material de alta calidad para aplicaciones de alto grado. El material de Lewis está entre los de mejor calidad del mundo y, hasta la apertura del yacimiento de Méjico, NYCO tenía que moler el material de alto ratio para poder venderlo en los mercados de bajo ratio.

Además de la adquisición de la mina mejicana, NYCO ha investigado nuevos yacimientos en China, habiendo evaluado algunos yacimientos en la provincia de Liaoning, especialmente un depósito que

¹⁰.- t.c. = tonelada corta. La equivalencia es 1 t.c. = 0.89287 t (N.A.)

NYCO cambió la denominación de sus productos con revestimiento superficial de **Wollastokup** a **Wollastocoat**, debido al cambio en el tipo de tratamiento empleado. Cuando comenzaron las operaciones de tratamiento superficial, NYCO contaba con un revestimiento superficial basado en el silano y patentado por *Malvern Minerals Co.* (Malvern, Arkansas). *Malvern Minerals* le exigió a NYCO que utilizase el sufijo "kup" en los productos de la empresa para significar que se estaba utilizando la fórmula de revestimiento de la *Malvern*. Varios años más tarde y tras una inversión importante en I+D, NYCO desarrolló su propia fórmula de revestimiento superficial, lo que ha llevado al uso del sufijo "coat".

Los productos wollastoníticos de NYCO se emplean para sustituir asbestos y en plásticos, cerámica, metalurgia y pintura. La Fig. 63 muestra la distribución del consumo de wollastonita, por sectores, en los Estados Unidos.

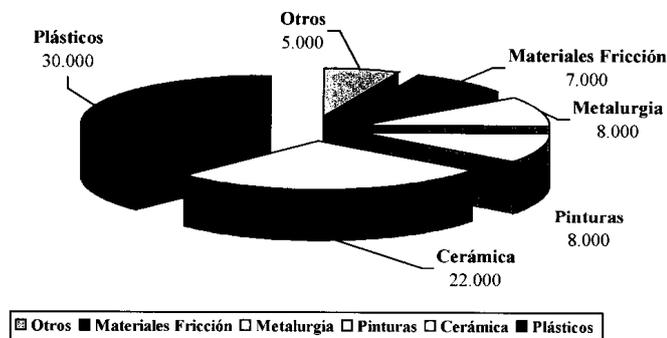


Fig. 63.- Distribución del consumo de wollastonita en los EE.UU. (1997)

NYCO, además de ser el mayor productor de wollastonita del mundo, también es el principal productor de granates de EE.UU., con una producción total de 10.000 t/año y posee la *American Tripoli Inc.* (Seneca, Missouri) que produce variedades abrasivas de tripoli.

9.1.2.- R.T. VANDERBILT CO. INC.

Mientras que NYCO ha diseñado preferentemente su producción para el mercado de las cargas de alto rendimiento, *R.T. Vanderbilt Company Inc.* ha alimentado los mercados más tradicionales de la cerámica y las pinturas, tanto en América como en Europa, con un yacimiento de talco y wollastonita situado en la región de Gouverneur (NE del estado de Nueva York).

La Mina Gouverneur está localizada cerca de Harrisville (en una zona de 930 ha), produce unas 40.000 t/año y las reservas definidas están en el entorno de 1 Mt. La wollastonita se extrae junto con talco y el yacimiento, a diferencia del de NYCO, no presenta granate. La empresa que explota el yacimiento, *Gouverneur Talc Co. Inc.*, es una subsidiaria de *Vanderbilt* que emplea a 146 trabajadores. La explotación es tanto por interior como a cielo abierto.

A través de minería selectiva, para minimizar la incidencia de la calcita, el material extraído es tratado mediante un proceso relativamente simple: machaqueo, molienda en seco (mediante un reconvertido molino de bolas utilizado para el talco) y clasificación por aire. Una vez que el mineral ha sido

machacado "in situ" es transportado en camiones, aproximadamente unos 19 km, desde la mina a cielo abierto hasta la planta de procesamiento situada cerca de Balmat, donde se consiguen tres tamaños de malla: + 200, + 325 y - 325. Esta planta se utiliza, indistintamente, tanto para el procesamiento de la wollastonita como del talco.

El ratio relativamente bajo de la wollastonita de este depósito, que oscila entre 3:1 y 5:1, se complementa con una baja contenido en hierro y calcita, por lo que su procesamiento es sencillo. La estructura geológica está claramente diferenciada, lo que permite realizar una extracción selectiva que mejora la calidad del producto y facilita su tratamiento.

En 1986 *Vanderbilt*, mediante un "joint venture" con *Ankersmit Maalbedrijven BV* (subsidiaria de *Ankerpoort NV*), estableció una nueva planta de procesamiento en Holanda. Cerca de 4.000 t/año de la wollastonita de *Vanderbilt* se embarca con destino al procesador holandés que muele y procesa el mineral, transformándolo en un producto de alto ratio que va dirigido a los mercados europeos.

La wollastonita de Gouverneur sólo presenta calidades molidas y la compañía comercializa el producto bajo las denominaciones de **VANSIL**, que incluye tres tipos: **W-10**, **W-20** y **W-30**, con tamaños de partículas medias de 18.5 µm, 9.6 µm y 6.1 µm, respectivamente. La producción actual está en torno a las 40.000 t.c./año y los productos se utilizan en pintura, cerámica, plásticos y metalurgia.

Una de las principales prioridades de la compañía es la protección de sus empleados y del entorno medioambiental. Los trabajadores participan en entrenamientos anuales de Salud y Seguridad en la mina y los residuos son tratados por compañías locales especializadas. La compañía tiene un programa activo de Calidad Total y sus esfuerzos están orientados, últimamente, a obtener la certificación ISO-9002.

9.1.3.- OTROS

Hasta 1987 se produjo wollastonita por *Pfizer Inc.* en el oeste de los EE.UU. (condado de Riverside, California). *Pfizer* estaba dedicado principalmente a la minería del talco, pero procesaba un tonelaje relativamente bajo de una wollastonita de las Montañas Little and Big Maria, a unos 32 km al NO de Blythe. La planta de procesamiento estaba localizada en Victorville y tenía una capacidad de procesamiento combinado de 15.000-20.000 t.c./año. Sin embargo la mayor parte de esta capacidad de procesamiento estaba comprometida para arcillas cerámicas, por lo que la producción de wollastonita, alrededor de unos cientos de toneladas, se vendían a la industria cerámica local (*Power*, op. cit.).

American Wollastonite Mining Co., previamente *White Plains Resources Corp.*, de Vancouver (Columbia Británica, Canadá), continúa evaluando un permiso de wollastonita en la propiedad Gilbert, cerca de Tonopah (condado de Esmeralda, Nevada). Existen alrededor de 1 Mt de reservas probadas que contienen un 60-70 % de wollastonita con un ratio medio del 16:1. La empresa ha informado que está construyendo una planta piloto de 10.000 t/año, siendo los mercados previstos el Oeste de EE.UU. y el margen Pacífico.

9.2.- CHINA

Aunque la wollastonita es un mineral industrial relativamente reciente en China, pues se descubre en 1975 y se comienza a utilizar masivamente a partir de 1988, la industria del mineral está creciendo muy rápidamente. Su producción ha alcanzado un incremento importante: 50.000-60.000 t en 1990, 80.000-90.000 t en 1992, 120.000 t en 1994 y 170.000 t en 1997 (*Fattah*, 1994; *Harben*, 1999).

Hasta el inicio de la explotación de *NYCO* en Méjico, China era probablemente la mayor fuente de wollastonita del mundo; y, aunque ahora ha sido relegada al segundo puesto mundial, sigue siendo un factor de gran influencia en el mercado.

Existen más de 250 minas por el país, las cuales son propiedad de veinte empresas mineras, con un total de 7.500 empleados. Siete de ellas son públicas y emplean a 3.500 operarios y las 13 restantes son empresas ligadas a entidades locales (pueblos y ciudades) que agrupan a los 4.000 empleados restantes.

En 1994 el 58 % de la producción correspondió a las empresas estatales, siendo la capacidad total de producción minera y de separación manual de 300.000 t/año (Zhang, 1996).

La wollastonita china ha alcanzado una amplia aceptación, tanto en los mercados interiores como en los internacionales, y sus aplicaciones aumentarán constantemente. Se estima que la demanda de wollastonita china se incrementará en una proporción del 11-15 % y su producción se doblará. Hacia el 2010 la demanda total alcanzará las 500.000-1.000.000 t/año, abriéndose un gran futuro para el desarrollo de la minería de la wollastonita en China.

El contenido de wollastonita de los yacimientos chinos varía entre un 42-82 % de riqueza, con un valor medio del 56 %, permitiendo fácilmente su clasificación manual.

El material es generalmente de excelente calidad (la wollastonita acicular tiene un ratio > 20:1) y puede suministrarse para cubrir un amplio abanico de necesidades en diferentes industrias:

- pinturas y revestimientos (wollastonita \geq 90 % y blancura \sim 90 %)
- plásticos, cauchos y cargas (wollastonita \geq 90 % y blancura entre 85-90 %)
- cerámica y esmaltes (wollastonita \geq 95 % y blancura \geq 90 %)
- metalurgia (wollastonita \geq 80 %, $Al_2O_3 \sim$ 1 % y S/P \leq 0.02 %)

también se emplea en la elaboración de materiales de construcción, electrodos de soldadura, elementos de fricción y fertilizantes para agricultura.

El estado confía en la *China National Non-metallic Minerals Industrial (Group) Corp.* para fortalecer la posición comercial china y permitir el desarrollo saneado de la minería de la wollastonita. La *China Wollastonite Association* también jugará un papel importante y tomará medidas para que el desarrollo de la wollastonita en el futuro sea el adecuado.

9.2.1.- LISHU WOLLASTONITE MINING CORP.

Es la principal productora de China (80.000 t/año), con una importante aportación a la industria cerámica europea y de productos aciculares en Japón. Ubicada en Dadingshan (provincia de Jilin), explota dos depósitos de wollastonita con alto brillo y bajo contenido en hierro, Meiyaoshan y Tiengongshan.

La mina de Meiyaoshan, en funcionamiento desde 1980, produce unas 10.000-15.000 t/año con una ley del 52 %. De ella se obtienen principalmente variedades molidas de wollastonita, utilizadas como carga en plásticos, cauchos y vidrios cerámicos y, en menor proporción, también se produce calidad acicular. La mina de Tiengongshan produce unas 30.000-40.000 t/año de "todo-uno", con una ley del 68 % de wollastonita, de la que un 33 % se utiliza en la industria metalúrgica. El producto de esta mina es más acicular que la de Meiyaoshan, con ratios que varían entre 15:1 a 20:1 e incluso más altos (30:1).

Tanto Meiyaoshan y Tiengongshan son explotaciones a cielo abierto, con un recubrimiento escaso y ambas generan caliza como subproducto, produciéndose unas 200.000 t/año de caliza y 50.000 t/año de wollastonita.

La explotación de Dadingshan produce 13 variedades de wollastonita: tres de pellets (10-30, 30-50 y 50-150 mm), dos de polvo (10-20 y 20-150 μ m), cinco de variedades de polvo modificadas químicamente y

tres variedades micronizadas con partículas de tamaño medio de 45, 20 y 10 μm . Todas ellas tienen registrado un brillo $> 90 \%$ y se utilizan en pinturas, cerámica, caucho, plásticos y distintos usos metalúrgicos (Harben & Kuzvart, 1996).

En 1994 *Lishu* inició las actividades en otras dos minas, Fulapu y Shijianfang, cerca de Faku (provincia de Liaoning). En Shijianfang, a principios de 1994, el Liaoning Province Geological Prospecting Party descubrió unas reservas de 2 Mt de una wollastonita de alta calidad, siendo explotada mediante un "joint venture" entre *Lishu* y *Shijianfang Co.* El "joint venture" tiene una capacidad de producción de 10.000 t/año de wollastonita de alto ratio, aprovechada en la elaboración de materiales de construcción, cauchos y otros sustitutos del mercado de los asbestos.

Además de las cuatro minas indicadas *Lishu* posee otra mina en funcionamiento, Xiaoshuanpu, cerca de Daye (provincia de Hubei) que produce wollastonita en polvo (Bauer et al., 1994), junto con varios pequeños yacimientos en el distrito de Liaoning y otras minas en Panshi, Jilin y Faku.

Recientemente, *Lishu* ha anunciado el desarrollo de una nueva mina. El yacimiento de Leija está localizado al SE del yacimiento de Tiengongshan, a unos 22 km de la actual planta de la empresa (Anónimo, 1999).

La wollastonita de Leija es transportada a la planta de procesamiento donde es molida a 325 y 400 mallas, para suministrar al mercado doméstico así como para alimentar la industria cerámica de España e Italia, donde se utiliza para el esmaltado.

La mina está siendo gestionada en la actualidad por *Lishu Wollastonite*, quien ha obtenido suficientes fondos para la primera etapa de desarrollo, aunque la compañía está negociando con un posible socio para establecer un "joint venture" para poder desarrollar el proyecto futuro.

Lishu posee dos grandes plantas de procesamiento en Dalian. Una de ellas emplea un molino Raymond que machaca y pulveriza a 0.1-5 mm, produciendo unas 30.000 t/año que se aprovechan en baldosas cerámicas en Taiwan y en fundiciones metalúrgicas. La otra planta posee un sistema de clasificación por chorro de aire y produce variedades finas y muy finas de wollastonita, talco y zircón. Así obtienen unas 5.000 t/año de material de 1.250 mallas (10 μm) y más fino, junto con unas 10.000 t/año de productos más gruesos: 200 mallas (típico en China), 325 y 400 mallas (38 μm), aprovechados en la industria cerámica, plásticos y pinturas. El equipo tiene la capacidad de producir más de 10.000 t/año de un material de calidad de grano fino (1.250 mallas), gracias a sus tres clasificadores de flujo de aire e incluso obtener calidades superfinas > 2.500 mallas.

Las principales variedades de la empresa son: wollastonita calcinada en polvo (100-325 mallas), wollastonita sintética (0-325 mallas), para cerámica y esmaltes (200-325 mallas), para cargas (100-2.500 mallas), de uso metalúrgico (100-200 mallas) y para material de construcción (wollastonita pulverulenta de alto ratio: 15-20:1).

El producto más característico de *Lishu* tiene un contenido en $\text{Fe}_2\text{O}_3 > 0.4 \%$ para variedades metalúrgicas y $< 0.2-0.3 \%$ para cargas y esmaltes. No obstante, mediante separación magnética se obtiene un producto con una mayor pureza en $\text{Fe}_2\text{O}_3 (< 0.1 \%)$. En 2000 la planta de *Lishu* produjo 20.000 t/año de una wollastonita con bajo contenido en hierro y alta blancura.

Lishu ha establecido recientemente una nueva compañía, *Hunan Yi-zhang Dongfeng Dadingshan Co. Ltd.*, localizada en el límite entre las provincias de Guangdong y Hunan, la cual explotará y procesará wollastonita en el sur de China para servir al mercado de China meridional y del sudeste asiático.

Los equipos de procesamiento y los instrumentos de ensayo utilizados por la compañía han sido importados de Alemania, EE.UU. y Japón. El polvo procesado de alto ratio, aprobado por el Centro de Evaluación Redco (Bélgica), ha alcanzado especificaciones de calidad internacional.

La empresa cubre un amplio campo del mercado interior, con una distribución del 20 % en pinturas, 30 % en cerámicas, 30 % en caucho y plásticos y 20 % en otras aplicaciones entre las que se incluyen las metalúrgicas. Además exporta cerca de 20.000-25.000 t/año de wollastonita a todo el mundo.

Desde 1982 *Jilin Province Lishu Wollastonite Co. Import & Export Co.* ha exportado wollastonita, aumentando sus cifras cada año alcanzando 120.000 t en 1994, lo que suponía una tercera parte del total mundial. Las exportaciones chinas se orientan hacia los mercados de Europa, Japón, Taiwan, Hong Kong, Tailandia, sudeste asiático y otras zonas.

Existen dos clases de material exportado, el pellet y el polvo. El precio del pellet varía entre los 60-120 \$/t, en función de la calidad y de su aplicación. El polvo es también vendido en función de sus diferentes calidades o tamaños, oscilando alrededor de los 90-120 \$/t (no incluyendo polvo acicular).

9.2.2.- OTROS

Aunque se han producido pocos cambios entre los principales productores chinos, respecto a los dos últimos años, nuevas explotaciones han iniciado su andadura. En la provincia de Jilin se encuentra *Panshi Jianye Non-Metal Group Corp.*, con una producción de 35.000 t/año; en Liaoning están *Sanyi Mining Development Co. Ltd.* (40.000 t/año), *Tiefu Wollastonite Mining Corp.* (35.000 t/año), *Faku Wollastonite Mine* (20.000 t/año) y *Liaoning Jiangping Fushan Wollastonite Mine* (15.000 t/año de producción de pellets y polvo); en Hubei, la *Hubei Huangshi Xinya Mining Co.* está preparada para producir 10.000 t/año de polvo acicular; en Zhejiang, la *Zhejiang Changxing Wollastonite Mine* tiene una capacidad de 25.000 t/año; en Jiangxi se ha establecido la *Jiangxi Shanggao Wollastonite Co.*, de la que no existen datos en la actualidad respecto a su producción y potencialidad.

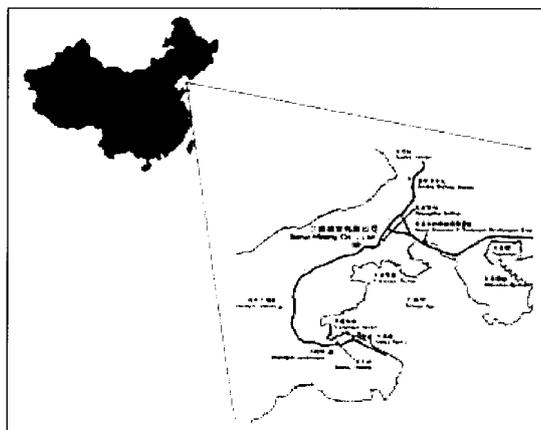


Fig. 64.- Situación de explotaciones y planta de tratamiento de *Sanyi Mining Development Co. Ltd.*

A principios de los 80 *Sanyi Mining Development Co. Ltd.* inició la explotación, procesamiento y desarrollo de minerales. En la actualidad, es propietaria de cuatro minas de wollastonita en la provincia de Jilin:

Hulan, Wanbao, Xiuyan y Changwaizi. La planta de procesado, que ocupa unos 18.000 m², está localizada en Dalian, famosa ciudad portuaria próxima a las minas (Fig. 64).

La mina de Hulan se encuentra en la localidad del mismo nombre (provincia de Jilin), a 40 km de la ciudad de Panshi y a 9 km de la estación de ferrocarril de Xinlan; siendo, en la actualidad, uno de los yacimientos con mayores reservas de wollastonita de China. El mineral es de alta pureza, buena blancura y bajo contenido en Fe y en PPC, como se observa en las siguientes especificaciones.

SiO ₂	49-52 %
CaO	44-47.5 %
Fe ₂ O ₃	≤ 0.2 %
PPC	≤ 2 %
Blancura	≥ 90 %

La wollastonita pulverulenta (200~400 mallas), se comercializa en dos clases: A y B (Tabla 12).

Clase	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	PPC (%)	H ₂ O (%)	Blancura (%)
A	49-52	44-47.5	≤ 0.2	≤ 2	≤ 1	≥ 90
B	48-52	43-46	≤ 0.3	≤ 3	≤ 1	≥ 89

Siping Wanbao Wollastonite Co. Ltd. ubicada en la localidad de Banshi (municipio de Siping, condado de Yitong), a 60 km de la ciudad de Panshi y 35 km de la estación de ferrocarril de Mingcheng, es copropiedad del gobierno local y de *Sanyi* (Fig. 65).



Fig. 65.- Diferentes aspectos de la mina de Wanbao

Con una buena estructura acicular y una alta blancura, la wollastonita acicular producida en esta mina es el material ideal para obtener polvo acicular. Sus características son:

SiO ₂	49-52 %
CaO	44-47.5 %
Fe ₂ O ₃	≤ 0.2 %
PPC	≤ 1.5 %
Blancura	≥ 90 %

La mina de Xiuyan, que es principalmente de espato cálcico, se encuentra en Dafangshen (condado de Xiuyan, provincia de Liaoning), a 50 km del condado de Youyan y a 180 km del puerto de Dandong y es explotada conjuntamente por *Sanyi* y el gobierno local. Existen dos áreas mineras y cuatro frentes en la explotación, con una potente capa de mineral, buena cristalización del mismo y un color blanco brillante (Fig. 66).

SiO ₂	43-44.5 %
CaO	54-66 %
Fe ₂ O ₃	≤ 0.03 %
CO ₃ Ca	≥ 99.3 %
Blancura	≥ 93 %

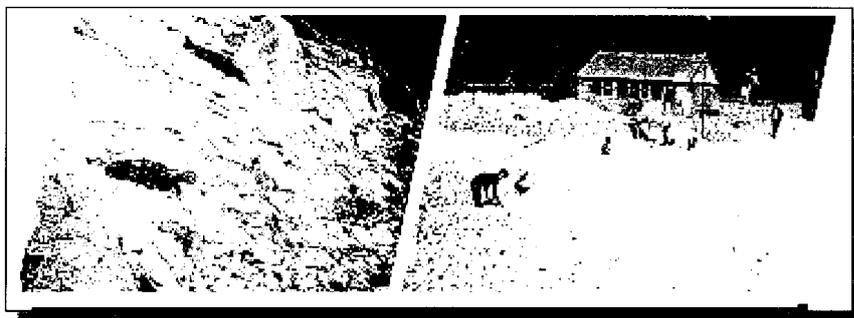


Fig. 66.- Distintas imágenes de la mina de Xiuyan

La mina de Changwaizi se halla a 55 km de la ciudad de Panshi y a 25 km de la estación de ferrocarril de Mingcheng, y también está siendo explotada por *Sanyi*. La explotación está compuesta por dos dominios mineros y nueve canteras. La wollastonita posee una alta pureza, bajo contenido en hierro y baja PPC. El producto de mayor calidad es ideal para su utilización en la siderurgia del acero, para porcelanas y cubiertas de electrodos para soldadura. Las características del mineral son:

SiO ₂	49-52 %
CaO	44-47 %
Fe ₂ O ₃	≤ 0.15 %
S	≤ 0.01 %
PPC	≤ 1.5 %
Blancura	≥ 90 %

La planta de procesamiento de *Sanyi Mining Development Co. Ltd.* posee unos equipos avanzados y un moderno laboratorio, y en la actualidad realiza el beneficio del mineral, la molienda, el procesamiento superfino, el tratamiento superficial del mineral y el empaquetado del producto (Fig. 67).



Fig. 67.- Detalle del estrío manual del mineral y vista de la planta de tratamiento de *Sanyi Mining Development Co. Ltd.*

Aunque las provincias de Jilin y Liaoning son las principales áreas productoras, también existen otras tres zonas, en el sur del país, con producción de wollastonita.

La mayor de éstas es Xinyu-Shanggao (Jiangxi), donde varios pequeños productores explotan minas a cielo abierto; tal es el caso de la *Jiangxi Shanggao Wollastonite Co.*, cuyo material es destinado principalmente a la producción de baldosas cerámicas en China y Taiwan. También se explota wollastonita en Zhejiang Changxing (región de Zhejiang), donde se encuentra la *Zhejiang Changxing Wollastonite Mine* (20.000 t/año) y en Lianzhou (Guandong).

El mercado doméstico de China se ha estimado en un máximo de 120.000 t/año, de las cuales alrededor del 60 % son consumidas por la industria cerámica (baldosas y vidriados). Aproximadamente el 30 % es consumido en la fabricación de barras de soldar y moldes y el 10 % restante se utiliza como cargas en pinturas y cauchos.

9.3.- INDIA

En India los primeros depósitos de wollastonita fueron descubiertos por H.P.R. Choudhary. La wollastonita se produce, junto con la calcita, en dos yacimientos: el de Belkappahar (distrito de Sirohi, estado de Rajasthan) y el de Kheratarla (distrito de Udaipur, estado de Rajasthan).

Estos yacimientos están localizados en un abrupto terreno montañoso cubierto por un denso bosque. Cuando se descubrió el yacimiento no existían infraestructuras en la zona. Se tardaban varias horas, a pie o en caballería, en alcanzar el emplazamiento y además la presencia de animales salvajes (osos, panteras y zorros) hacían aún más dificultosa la investigación.

Inicialmente los trabajos de limpieza y prospección duraban unas 2-3 horas al día, y se necesitaban desplazamientos diarios. Muchos meses antes se construyó una pista propia para mejorar los accesos, pero esos esfuerzos no sirvieron para mucho pues, durante la estación del monzón, las lluvias inundaron los caminos y los dejaron impracticables. Es importante señalar aquí que el primer embarque comercial de wollastonita (40 t) *fue transportado a lomos de burro* desde las minas a la ciudad de Sirohi, *durando dicha operación dos meses* (Jain, 1993).

Inicialmente se definió un área de 47 ha, obteniéndose en 1966 el pertinente permiso de exploración del Gobierno de Rajasthan. Este permiso fue, posteriormente en 1968, convertido en una concesión de explotación.

9.3.1.- WOLKEM INDIA LTD.

La empresa se constituyó en 1971 y le fue transferido el permiso minero obtenido por Choudhary en 1968. En 1972 *Wolkem* instaló una planta de procesado mineral en Sirohi Road (estado de Rajasthan) y, en 1975, obtiene otro permiso minero en la vecina localidad de Belkappahar.

Wolkem ha recorrido un largo camino desde sus inicios en los 70, pasando de las modestas 2.748 t/año extraídas en 1973 hasta las 80.000 t/año de 1997. Sus explotaciones son a cielo abierto y están semimecanizadas y en ellas se emplea a más de 2.000 trabajadores, pertenecientes a las etnias de la zona.

El recubrimiento se retira mediante maquinaria pesada y después se explota el depósito de calcita, bajo la cual se encuentra el yacimiento de wollastonita. La calcita y el estéril son separados de la wollastonita, la cual se hace pasar por una machacadora de mandíbulas y diferentes tamices. La separación entre la ganga y el mineral es manual.

En Belkappahar, en previsión de probables riesgos medioambientales, se diseñó una escombrera del tipo "relleno de valle". Se han hecho las transformaciones precisas en los riachuelos, para dejar libre el flujo del agua durante la estación lluviosa; para ello se han colocando en el fondo del río lechos filtrantes, constituidos por gravas de gran tamaño. En la parte alta del arroyo se ha construido una presa de tierra con un aliviadero, para que en caso de grandes precipitaciones el flujo sobrante de agua pueda circular. En la base de la escombrera se colocaron muros de retención con tuberías para el drenaje del agua.

También se diseñó una plantación de árboles, a gran escala, tanto en la escombrera como a lo largo de las trincheras de las carreteras y en las laderas de las lomas, habiéndose instalado una pequeña plantación en el valle. En las minas de Belkappahar han sido plantadas cerca de unas 40.000 plantas de 66 especies diferentes, incluyendo variedades de frutales, herbáceas, praderas y flores.

De igual forma en el pueblo de Thandiberi, se ha desarrollado una plantación forestal social sobre 20 ha de terreno estéril. Cerca de 13.000 plantas han sido plantadas entre 1990-1993, para mantener el balance ecológico.

La wollastonita de *Wolkem* está considerada como la más pura del mundo, lo que implica asegurar el control de calidad para ciertas aplicaciones. Incluso, contenidos mínimos de calcita, granate o diópsido, pueden afectar negativamente a la calidad del producto final, por lo que se precisa un gran cuidado durante el proceso de beneficio del mineral (Tabla 13).

El mineral pasa, primeramente, por una machacadora de mandíbulas que lo reduce a tamaño de pequeños pellets para facilitar su manejo y transporte. El machaqueo libera la wollastonita de las impurezas asociadas y después, mediante una separación manual, se eliminan las impurezas.

Tabla 13. Características de la wollastonita de <i>Wolkem</i>					
Propiedades físicas tipo		Propiedades químicas tipo		Análisis químico garantizado	
		(%)		(%)	
Fórmula química	SiO ₃ Ca	CaO	47.04	CaO + SiO ₂	≥ 96.5
Color	blanco	SiO ₂	49.52	Fe ₂ O ₃	≤ 0.5
Forma de la partícula	acicular	MgO	0.20	Al ₂ O ₃	≤ 1.5
Peso molecular	116	Al ₂ O ₃	0.60	PPC	≤ 2.5
Peso específico	2.9	Fe ₂ O ₃	0.43		
pH (solución al 10 %)	7.0-7.8	TiO ₂	trazas		
Dureza de Mohs	4.5	MnO	0.29		
Densidad bruta (kg/m ³)	600-850	Na ₂ O	0.02		
Punto de fusión (°C)	1.540	K ₂ O	0.11		
		PPC	1.79		

Fuente: Jain (1993)

Tras retirar las impurezas del mineral éste se transfiere a la factoría para su procesamiento en varios tamaños de mallas, de acuerdo con las necesidades del cliente. Para ello se utiliza la pulverización y otros tipos de molienda y tras pasar por los separadores magnéticos se eliminan las partículas extrañas. Para asegurar una buena distribución del tamaño de partícula, se usa un sistema de clasificación por aire. El sistema genera aire seco, que no tiene efectos negativos para las propiedades básicas del mineral. El producto final es empaquetado en bolsas de fibra de plástico, en bolsas con varias capas de papel y también en bolsas gigantes de más de 1.000 kg de capacidad ("big bags").

Wolkem vende su producto bajo la marca **Kemolit** en diferentes tamaños de malla, de acuerdo con las necesidades del cliente. Sus productos son: **Kemolit S-4** (polvo a 400 mallas), **Kemolit S-3** (polvo a 300 mallas/50 µm), **Kemolit S-2** (polvo a 200 mallas/75 µm), **Kemolit S-1** (polvo a 100 mallas/150 µm), **Kemolit A-60** (polvo grueso de forma acicular), **Kemolit D-1** (polvo fino de alto ratio).

Las variedades de polvo: **S-1**, **S-2**, **S-3** y **S-4** se emplean principalmente en la industria cerámica y metalúrgica, con una pequeña proporción usada en revestimientos y los productos de alto ratio **A-60** y **D-1**, son ampliamente utilizados como sustitutos de asbestos y productos de fricción.

Mientras, *Wolkem* inició sus incursiones en el sector de los plásticos; intentándolo en los mercados locales del nylon y del polipropileno, especialmente para aplicaciones automovilísticas e industriales. Para ello inauguró una nueva planta de tratamiento superficial cerca de Udaipur, utilizando al principio (1991) un equipo provisional de tratamiento superficial que fue, más tarde, reemplazado por una planta completa con capacidad de 5.000 t/año y que se construyó en 1992. Si el mercado lo demanda, la empresa tiene pensado incrementar la planta en los próximos años.

La compañía también ha instalado nueva maquinaria para la producción de más de 10.000 t/año de wollastonita y calcita micronizada (5-10 µm)

Las principales aplicaciones de los productos de la compañía son: baldosas cerámicas y vidriadas, sanitarios, revestimientos de frenos e industria metalúrgica; mientras que en Europa y los EE.UU. la producción se orienta hacia productos de fricción y materiales de construcción. Un número importante de productores europeos de la industria cerámica, particularmente los de la zona mediterránea, utilizan

wollastonita de la India y será interesante ver la evolución del mercado cuando entre en funcionamiento el nuevo yacimiento de Aldea del Obispo (Salamanca).

De cara a la comercialización del producto, *Wolkem* afrontó tres retos importantes:

- 1º.- convencer a los clientes de la utilidad del mineral
- 2º.- conseguir que considerasen a *Wolkem* como un productor de confianza
- 3º.- cumplir con las especificaciones del cliente

El primer reto fue convencer a los futuros clientes de que la wollastonita era verdaderamente útil, más económica y además un sustituto más valioso para utilizar como carga que las sustancias que se estaban empleando actualmente. Esto necesitó de intensos ensayos de laboratorio y pruebas en plantas piloto. En muchos casos los futuros clientes se convencieron de su idoneidad, pero ello suponía invertir en cambiar sus actuales procesos de manufacturación, lo que no suponía una decisión fácil.

Las exportaciones presentaron problemas muy complejos, debido a la pobre infraestructura existente en India para exportaciones minerales. Los clientes europeos necesitaban un estricto control de calidad y un empaquetado excelente, desafortunadamente no era extraño encontrar que un camión cargado de sacos de wollastonita fuese descargado mediante ganchos que rasgaban los sacos de plástico o yute con la consiguiente pérdida de la carga. Estos sacos, gravemente deteriorados, se cargaban en contenedores que producían, al llegar a su destino, una impresión desfavorable entre los clientes internacionales.

Incluso la utilización de “palés” en la India, a mediados de los 80, era poco frecuente; lo que producía grandes problemas en los suministros a Occidente. De hecho alguno de los distribuidores de *Wolkem* han tenido que gastar grandes sumas de dinero por descargar estos contenedores saco a saco y después paletizarlos, para así suministrar el producto a sus clientes; lo que afectaba a la competitividad de *Wolkem*. Estos problemas aumentaron con los embarques, ya que los contenedores podían tardar hasta dos meses para alcanzar los puertos europeos.

El segundo reto al que se enfrentó la empresa fue al de la credibilidad, lo que tuvo que compaginar con el incremento de ventas de calcita respecto a las de wollastonita en las primeras etapas de vida de la empresa.

Inicialmente *Wolkem* sobrevivió gracias a sus yacimientos de calcita, ya que el negocio de la wollastonita tardó años en iniciarse. La buena reputación de *Wolkem* como suministrador de ese mineral, facilitó que la compañía ganase una fuerte cuota del mercado de calcita. La compañía también ofreció acceso abierto a sus minas de calcita/wollastonita para proporcionar la mejor prueba posible sobre la calidad del mineral. Los clientes fueron también invitados a visitar la gran planta de procesado, situada en Pindwara (distrito de Sirohi). También se diseñaron y utilizaron nuevos parámetros de control de calidad en el proceso de elaboración, cada vez más estrictos.

El tercer reto, fue ajustar el procesado del mineral a las necesidades de los clientes. Estos eran muy reticentes a dar información acerca del uso que daban a la wollastonita y únicamente estuvieron dispuestos a compartirla cuando constataron que ello favorecía a sus necesidades.

Afortunadamente todos los obstáculos se han resuelto satisfactoriamente y *Wolkem* controla casi el 100 % del mercado de wollastonita de la India y alrededor del 60 % del de calcita. Hoy *Wolkem* es conocido a lo largo del mundo como un suministrador importante, de calidad asegurada y que distribuye sus productos en el mercado interior y en Australia, Japón, Singapur, Malasia, EE.UU. y Europa. En EE.UU. *Intercorp* (Milwaukee, Wisconsin) procesa y distribuye el material, y en Holanda *Ankerpoort NV* procesa y modifica la superficie de la wollastonita importada en forma de pellets.

9.4.- FINLANDIA

9.4.1.- PARTEK INDUSTRIAL MINERALS

Aproximadamente a 3 km al sur de Lappeenranta, en la parte suroriental del país, la división minera del gigante finés *Partek Corp.*, *Partek Industrial Minerals*, controla la única explotación europea de wollastonita y la cuarta del mundo, la Mina Ihalainen.

La caliza del yacimiento de Lappeenranta se explotó, durante años, como materia prima para la fabricación del cemento y no fue hasta 1957 que se explotó la wollastonita. Inicialmente la wollastonita se utilizó como el principal componente de la base para azulejos porosos para la planta cerámica de Turum Kaakeli de *Paraiten Kalkki Oy* (antigua denominación de *Partek*), en Turku. Durante ese tiempo el mineral se explotó a cielo abierto, siendo primero volado, después machacado y finalmente clasificado manualmente en pilas de wollastonita, caliza y estéril.

Como en muchos yacimientos de wollastonita los minerales accesorios, tales como la calcita, hacían que el yacimiento no fuese rentable mediante técnicas convencionales de procesamiento en seco, como las utilizadas en los EE.UU. No obstante estudiando los mercados de los revestimientos de papel, para utilizar la calcita de alta pureza y blancura que aparecía asociada a la wollastonita y beneficiando el mineral "in situ", *Partek* fue capaz de diseñar en 1967 una técnica muy sofisticada de flotación por espuma, donde la calcita se recuperaba en superficie y la wollastonita precipitaba en el fondo.

El proceso constaba de dos etapas. En la primera, una fracción de silicato en bruto conteniendo wollastonita se flotaba utilizando un colector de amina, dejando la calcita atrás; la segunda etapa incluía la separación de la wollastonita del resto de la fracción silicatada, utilizando un colector de amina y otro aniónico.

En este nuevo sistema, tras moler en húmedo mediante un molino de barra, hidrocliclonar y separar la calcita, los restos de wollastonita son sometidos a separación magnética, espesado, filtrado al vacío y finalmente pulverizado. Este sistema se emplea, tanto para separar la calcita de la wollastonita, como para beneficiar la calcita misma. El producto final contiene un 90 % de wollastonita, 2 % de cuarzo, 3 % de calcita y 5 % de otros silicatos (Fig. 68).

Partek ha sido el único productor que ha tenido éxito al utilizar la flotación para producir wollastonita, aunque *NYCO* también planea usar la flotación como método de beneficio en su yacimiento de Hermosillo (Méjico).

En 1979 se instaló un separador óptico, seguido de una unidad adicional más tarde. Este método permitió a *Partek* eliminar la separación manual y mejorar la calidad del producto en la planta de flotación. En ese año la planta tenía una capacidad de 20.000 t/año.

En 1986 la técnica de flotación de la empresa, junto con mejoras en la separación magnética de alta intensidad y la instalación de una nueva automatización, con unos costos totales de unos 5 M\$, permitieron que la capacidad de procesamiento de la planta se doblase, alcanzando unas 40.000 t/año. El hecho de conseguir duplicar la capacidad no fue debido únicamente al incremento del crecimiento de los mercados de la wollastonita, sino a las mejores perspectivas de la calcita, como subproducto, en aplicaciones de revestimiento de papel.

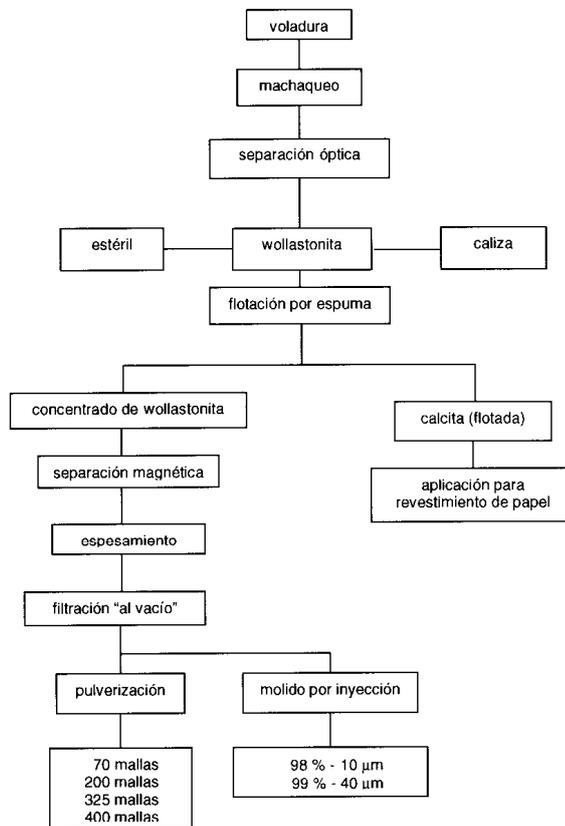


Fig. 68.- Diagrama simplificado de procesamiento de wollastonita de *Partek* (según Power, 1986)

El rendimiento del yacimiento permitía alcanzar cifras de 200-250 kg/t de wollastonita y más del doble de esa cantidad, 500-600 kg/t, de calcita.

La wollastonita pulverulenta (molida) de *Partek* se comercializa en cinco tipos: **FW 70** (212 μm), **FW 200** (75 μm), **FW 325** (45 μm), **FW 425** (35 μm) y **FW 635** (20 μm). Sin embargo, con ratios de sólo 3:1 a 4:1, estos productos están restringidos a aquellos mercados donde la importancia de la longitud de la fibra no es demasiado importante. En un esfuerzo para incrementar este ratio, *Partek* ha instalado un sistema de pulverizado por chorro de aire, que debería ayudar a la exfoliación de la wollastonita y así obtener ratios > 20:1. Esto se conseguirá en detrimento del tamaño de partícula y el material micronizado estará disponible en cuatro tamaños, desde 63 μm a 10 μm. Este material tiene futuro en los mercados de sustitución de asbestos y en los de plásticos reforzados. *Partek* también suministra productos con modificación química, de acuerdo con las especificaciones de los clientes.



Fig. 69.- Detalle de la wollastonita de Ihalainen (Finlandia)

La producción estimada de *Partek*, en 1997, fue de 25.000 t/año de wollastonita de variedad molida y de 1.400 t/año de producto micronizado, con un ratio de 5:1 a 10:1.

*Partek*¹¹ ha jugado un papel dominante en el mercado europeo de la wollastonita; pero la compañía ha visto como las importaciones de wollastonita india, y especialmente china, aumentan en los mercados de más bajo valor económico, mientras que la competencia con los productores norteamericanos ha continuado. Los principales mercados de la empresa son, actualmente, Italia, Alemania, España, Francia y el Reino Unido, mientras que un menor volumen es consumido en Asia.

Aproximadamente el 60 % de la producción de *Partek* se consume en esmaltes cerámicos, el 15 % en plásticos y el 25 % restante en bases cerámicas y fundidos metalúrgicos.

Debido al incremento en Europa de las exportaciones de wollastonita más económica procedente de India y China, la compañía ha comenzado a centrarse en producir wollastonita revestida superficialmente, con un alto valor, para su utilización en plásticos. Por ello, a finales de 1993, abrió una nueva planta de revestimiento superficial en Lappeenranta, que presenta una capacidad de 8.000 t/año de wollastonita micronizada y tratada superficialmente, obteniendo ratios de 5:1 a 10:1. La planta, actualmente, produce dos variedades: **WIC40** (40 µm) para utilizar en polipropileno y poliamidas y **WIC10** (10 µm), para utilizar en poliamidas, poliuretanos y polietileno.

En 1994 *Partek* planeó producir más de 400 t de **WIC10** y 1.000 t de **WIC40**. Incluso con la introducción de la wollastonita de alta graduación, los productos para cerámica representan un importante sector de las actividades de la empresa. En conjunto, la wollastonita de alta calidad se utiliza principalmente en fritas y esmaltes en toda Europa, mientras que la wollastonita de baja calidad se utiliza en bases para azulejos que pueden contener más del 50 % de wollastonita.

¹¹.- Noticias sin confirmar apuntan a un descenso generalizado de la producción en los últimos dos años (N.A.)

La compañía madre, *Partek Corp.*, ha colaborado de una forma importante en el mercado cerámico a través de su 50 % de propiedad de *United Tiles*, que produce baldosas y azulejos cerámicos. *United* se formó en 1991, cuando la división cerámica de *Partek* se unió al productor sueco *Tarkett AB*, propiedad de la firma sueca *Proventus AB*. La principal estrategia de *Partek*, tras la fusión, fue aumentar la fabricación de baldosin cerámico a un nivel más global. Desde la fusión, *United Tiles* ha crecido rápidamente hasta hacerse una de las principales compañías productoras de baldosas, con una facturación anual en ventas de 217 M\$ y una capacidad de producción de 12-13 Mm²/año. Esta firma ha construido cuatro plantas en Finlandia, Suecia, Alemania e Italia.

En Finlandia el principal consumidor de *Partek* es *Oy Pukkil*, una rama de *United Tiles*, empresa subsidiaria de *Partek*, mientras que en Suecia, *Partek Hoganas AB* es el mayor productor del sector cerámico.

Entre *Oy Pukkil* y otra rama de la *United Tiles*, *Klingenberg Dekoramik GmbH* de Alemania y destacado productor de cerámicos vidriados, el gigante finés distribuye unas 5.000 t/año de una wollastonita de 70 mallas; aunque el mayor productor cerámico del grupo es *Nuove Ceramiche Ricchetti srl*. en Italia, con una capacidad anual de más de 9 Mm²/año.

Aparte del yacimiento de Lappeenranta, la compañía inició en 1995 un programa de exploración completo en su permiso de Savitapale, antes de desarrollar una planificación minera adecuada y asegurarse unas mayores posibilidades de producción de cara a asegurarse sus mercados europeos.

9.5.- MÉJICO

La wollastonita ha sido explotada en Méjico, durante muchos años, como roca ornamental. La producción total de wollastonita ha sido siempre bastante variable, debido al relativo estancamiento de la economía en los últimos años. Inicialmente en los años 70 fue muy errática, con variaciones entre 500-4.300 t/año; siendo en 1979 cuando se sobrepasó por primera vez las 10.000 t. La producción mejicana ascendió en 1980 a 20.905 t, habiendo caído posteriormente al entorno de las 13.000-15.000 t, para elevarse a las 25.000 t en 1997 y ascender en los próximos años, con la entrada en funcionamiento de la mina de Hermosillo, a cifras que rondarán las 80.000-100.000 t.

La wollastonita mejicana se utiliza principalmente en aplicaciones cerámicas, aunque pequeñas cantidades se utilizan en productos de fundición y en pintura. Ocasionalmente se suministra a los mercados externos vecinos de Nicaragua y Ecuador. No obstante, se espera que los mercados cerámicos crezcan en los años venideros ayudados por el Acuerdo de Libre Comercio con los Estados Unidos, que ha abierto nuevas puertas a los productos mejicanos. Sin embargo, los productores mejicanos son muy cautos respecto al nuevo yacimiento de Hermosillo, propiedad de *NYCO*, pues aquellos que planeaban aumentar significativamente la producción pueden encontrarse con un gran competidor en el futuro.

La mayoría de los productores de wollastonita se encuentran en el estado de Zacatecas, aunque también hay en el de Sonora. Otras zonas de Méjico con potencial de producción de wollastonita son: Sierra Maestra, en el distrito de Llanos (norte de Puebla); Sierra Tlayacao, en la zona de Naica (Chihuahua) y en Rancho San Juan, cerca de Xalostoc (Elevatorski, 1983). En la actualidad hay una serie de compañías que comercializan wollastonita, siendo las más importantes las siguientes.

9.5.1.- MINERA NYCO, S.A. DE C.V.

Al NO de Hermosillo (estado de Sonora), se localizaron dos grandes yacimientos de wollastonita: Pilares y San Héctor, que atrajeron la atención de diversas compañías extranjeras. En 1994 *NYCO Minerals Inc.*

adquirió, a través de su empresa madre *Fourding Coal Ltd.*, el yacimiento de Pilares como resultado de un programa de exploración centrado en yacimientos en la Columbia Británica (Canadá) y en el NO de Méjico.

La propiedad adquirida, con 465 ha de derechos mineros y 777 ha de terreno, contiene unas reservas superiores a los 26.8 Mt de mineral. El yacimiento se ha descrito como de alta calidad y alto grado, con una variación de productos que oscilan desde material de alto ratio, a productos molidos y a polvo de grano fino.

Fourding Coal constituyó una compañía subsidiaria mejicana, *Minera NYCO, S.A. de C.V.*, que es la propietaria del permiso y que explota el yacimiento. Esta operación representó una inversión de alrededor de 100 M\$.

La empresa ha decidido utilizar un sistema de flotación para separar la calcita intersticial. También continuó con los programas de sondeos de exploración y de desarrollo, e inició las primeras etapas de la construcción de una planta de molienda y micronizado (Fig. 69). Finalizando la evaluación geológica y el diseño del proceso de refinado del mineral a finales de 1994.

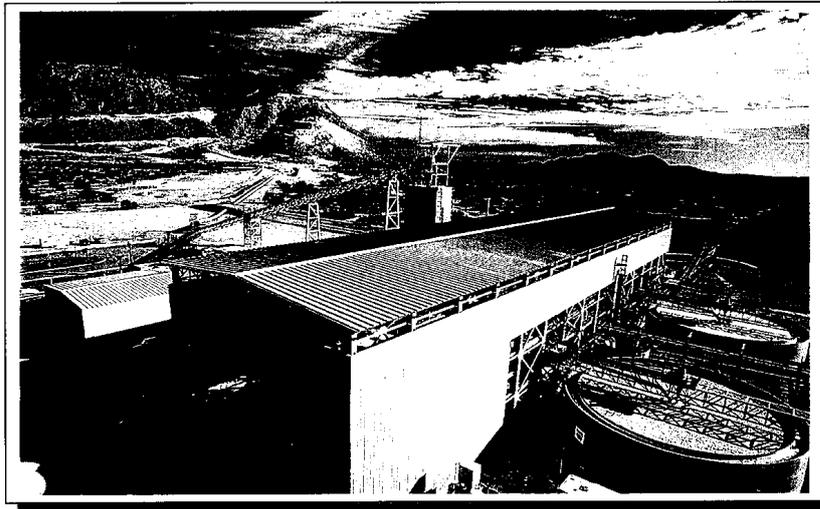


Fig. 70.- Planta de procesado de *Minera NYCO, S.A. de C.V.* en Sonora. Al fondo aparecen las Montañas Pilares, de donde se extrae el mineral (según Bolger, 1998)

El inicio de la producción de la mina de Hermosillo, en la primavera de 1998, incrementó la capacidad de producción mundial de wollastonita en una tercera parte. Con una capacidad de alrededor de 240.000 t/año, este proyecto es la mayor explotación individual de wollastonita del mundo.

Aunque estudios piloto de molido (pulverización) demostraron la viabilidad de obtener wollastonita de alto ratio, las ventas del producto mejicano se han centrado en la industria cerámica, revestimientos,

cemento, sector metalúrgico y del tablero prefabricado, industrias para las cuales las especificaciones son menos duras que para la del plástico.

Los productos específicamente designados para la industria de los plásticos se introducirán en los próximos años. El retraso en la introducción de estos productos se debe al resultado de largos debates entre el desarrollo del producto y su aceptación en la industria de los plásticos.

NYCO reconoce que esta adquisición es parte de una reentrada, no agresiva, en la industria cerámica y fundamental para un amplio plan estratégico de la compañía para aumentar significativamente sus cuotas de mercado en todos los segmentos del negocio, de cara al siglo XXI. La explotación mejicana permitirá mejorar la competitividad de *NYCO* en Latinoamérica, Oriente Próximo y, posiblemente, Europa. En los últimos años, esas tres áreas consumieron el 2 %, 8 % y 35 % de la producción de la compañía, respectivamente.

En los últimos dos años *NYCO* ha incrementado su capacidad, desde las 130.000 t/año a las 150.000 t/año de producto acabado, merced a su planta de Nueva York. La suma de este nuevo yacimiento a los 10 Mt de reservas de Willsboro, facilitarán a la compañía competir estratégicamente y distribuir wollastonita a través de todo el mundo, permitiéndole ampliar las reservas del mineral durante los años venideros.

Aunque ambas explotaciones son capaces de producir una gran oferta de productos de wollastonita, el yacimiento de *NYCO*-Nueva York puede ahora centrarse en la producción de material para aplicaciones de alta calidad. La calidad de la wollastonita de Willsboro está entre las mejores del mundo y, hasta la apertura del yacimiento de Hermosillo, *NYCO* tuvo que moler el material de alto ratio para conseguir venderlo en los mercados de calidades más inferiores.

9.5.2.- GENERAL DE MINERALES, S.A. (GEMINSA)

Esta compañía, propiedad del *Grupo Lamosa*, opera dos minas a cielo abierto en las proximidades de la ciudad de Guadalupe (estado de Zacatecas). Una de ellas en Santa Fe, cerca de Noria del Cerro (a 65 km al sudeste de Guadalupe) y la otra cerca de la ciudad de Pánfilo Natera (a unos 50 km de Guadalupe).

El mineral se transporta a la planta de procesamiento de la compañía (situada en Guadalupe) donde es clasificado manualmente, machacado y molido para obtener productos de tamaño: + 75 µm, 6.3 mm, 12.5 mm y 76.2 mm para su utilización en cerámica. En 1993 casi se produjeron 19.700 t de wollastonita en polvo y acicular, de las que 18.900 t fueron consumidas en cerámica (70 % en baldosas blancas, 25 % en baldosas rojas y 1 % en vidriadas) y las 780 t restantes se emplearon en aplicaciones metalúrgicas (3 % en fundición y 1 % en revestimiento de electrodos de soldadura). Cerca de un 10 % de la wollastonita de la compañía es acicular, y la empresa está tratando de utilizar esa parte del producto para acceder a los mercados mejicanos y de EE.UU. de los plásticos, sustitución de asbestos y pinturas.

En 1994 *Geminsa* suministró menos cantidad de wollastonita a la industria cerámica que en 1993, debido a ciertos clientes que redujeron sus pedidos de mineral para sus tratamientos, por causa de la alta abrasión de la wollastonita. La distribución geográfica de los fletes de la empresa en 1993 fue: 71 % en el área de la ciudad de Monterrey, 25 % en la región de Tlaxcala, 3 % en la región de Monclova y un 1 % en las proximidades de la ciudad de Chihuahua. La compañía también informó que, a causa de la entrada en vigor del acuerdo con los EE.UU., varias compañías (incluyendo una norteamericana y una italiana) habían expresado su interés en comprar la explotación. Se cree que, la propietaria de *Geminsa*, está aún valorando las ofertas.

9.5.3.- MINERALES Y MAQUILAS DEL NORTE, S.A. DE C.V. (MMN)

MMN explota una mina en el distrito de La Blanca, a unos 20 km al NE de Ojocaliente (estado de Zacatecas). Se extraen unas 15.000 t/año de mineral, de los que se obtienen más de 11.000 t de producto en una planta en Santa Catalina.

La compañía produce cinco variedades de wollastonita: machacada a 0.5" (para cerámica), machacada a 0.25" (para aplicaciones en fundición), tamizada a < 100 mallas (para cerámica), natural a < 200 mallas y natural de < 325 mallas (para cerámica y pintura). Aproximadamente el 95 % de la producción de *MMN* se consume por productores cerámicos en el noreste de Méjico, para la producción de azulejos, piezas rústicas (decorativas), alfarería, esmaltes y otros productos cerámicos e, incluso, para el mercado norteamericano.

9.5.4.- OTROS

La Mina Santa Fe, aproximadamente a unos 40 km al sur de Pichualco (norte del estado de Chiapas), es propiedad de la *Compañía Minera de Cerralvo* y ha producido algo de wollastonita como subproducto en el tratamiento del cobre. En los 70 se produjeron unas 1.000 t para suministrar las necesidades de la industria local de pintura.

A principios de los 60, y como respuesta al incremento de la demanda mundial, *Wollastonita de México, S.A.* comenzó la producción a gran escala en el distrito de La Blanca (estado de Zacatecas). La mina se cerró en 1989 debido a la muerte del principal accionista de la compañía y fue posteriormente adquirida por *Arcillas Industriales de Durango S.A. de C.V.* Informes sin contrastar citan que la explotación comenzó a funcionar en 1994 con una producción de 500 t/año (Fattah, 1994).

El yacimiento se encuentra entre los pueblos de El Saucito y Noria del Cerro. El método de explotación fue a cielo abierto y por interior. El material, clasificado a mano, se transportaba por camiones hasta el ferrocarril en Berriozabal para suministrar los centros de consumo, preferentemente las fábricas de azulejos de Zacatecas y Ciudad de Méjico.

NYCO, sin embargo, no es el único interesado en la wollastonita mejicana. Junto a la nueva propiedad adquirida por *NYCO* se encuentra el yacimiento de San Héctor, propiedad de *Cominco Resources International Ltd.* de Vancouver (Canadá) a través de su filial mejicana *Cia. Minera Constelación, S.A. de C.V.* Aunque ya han sido completados algunos de los ensayos de beneficio, *Cominco* ha decidido mantener el proyecto en reserva hasta que las condiciones económicas sean más favorables. La mayoría del trabajo se ha centrado en el cuerpo meridional del yacimiento, un mármol con wollastonita-calcita-cuarzo-diópsido, que contiene unas 700.000 t con una riqueza del 70 % de wollastonita.

Fernández Fuentes Judith también produjo wollastonita de un yacimiento próximo a la localidad de Pánfilo Natera (Power, 1986); aunque esta referencia, probablemente, coincida con alguna de las explotaciones que en esa localidad tiene la empresa *Geminsa*.

Además de las compañías citadas anteriormente existen en la actualidad una serie de empresas que explotan wollastonita en Méjico, de las que no hemos podido averiguar más datos que su denominación, a través de la Consejería Comercial de México en España. Se trata de las empresas: *Francisco Gerardo González Mejía, Minerales No Metálicos Mexicanos, S.A. de C.V., Compañía Minera Gral. Rodolfo Fierro, S.A. de C.V., Talcos Lozano, S.A. de C.V.* y *Minera Basal*.

9.6.- ÁFRICA

9.6.1.- KENYA

Hasta inicios de los 80 Kenya era un frecuente, aunque bastante errático, suministrador del mercado europeo desde Lolkidongai, en el corazón de la tierra Masai y a unos 80 km al sur de Nairobi. Estos depósitos, que afloraban en tres colinas, fueron inicialmente descubiertos a mediados de los 60 y estaban constituidos por intercalaciones de mármol wollastonítico masivo y mármol puro.

La minería selectiva por separación manual producía un material rico en wollastonita-calcita que se beneficiaba en Nairobi mediante flotación por espuma. Con la mayoría de la calcita eliminada, el producto final tenía una composición del 87 % de wollastonita y el resto era principalmente sílice. El material kenya se suministraba en un tamaño de 60 mallas (Power, 1986).

En la actualidad, no existe información acerca del estado operacional de la mina.

9.6.2.- NAMIBIA

Martin & Robson Pty. Ltd. de Johannesburg iniciaron, a mediados de 1984, la explotación de una mina en Usakos y produjeron unas 4.800 t/año de un material blanco muy puro. La roca se transportaba a la planta de Gravelote (en la vecina República de Sudáfrica), donde se reducía a un tamaño de 200 mallas y se embasaba.

Las reservas del yacimiento estaban evaluadas en unas 40.000 t, vendiéndose localmente una tercera parte de la producción y el resto se exportaba (Power, 1986).

Desde 1991 la mina estuvo funcionando a bajo rendimiento, hasta que la compró *Namaqua Wollastonite Pty. Ltd.*, establecida en Luipaardavlei, quien obtuvo de ella más de 1.500 t/año. La mina, gestionada ahora por *Usakos Wollastonite Mines Ltd.*, subsidiaria de *Namaqua*, produce una variedad de wollastonita de 15 µm, consumida en las industrias locales de azulejos, cubiertas de frenos, plásticos y metalurgia, así como en mercados nacionales y extranjeros de fundentes de soldadura. *Namaqua* ha mejorado, recientemente, su planta para aumentar la producción y ha aplicado técnicas especiales propias para la molienda, para así conseguir un producto acicular. Sin embargo la empresa ha encontrado que los mercados de Namibia no tienen experiencia en la utilización de la wollastonita y requieren un aumento del conocimiento de las diferentes aplicaciones. Pese a ello *Namaqua* es optimista acerca del desarrollo futuro del mercado local (Fattah, 1994).

9.6.3.- REPÚBLICA DE SUDÁFRICA

Durante la década de los 70 e inicios de los 80 se registraba producción de wollastonita en Garies, en el área de Springbok (Namacualandia, parte septentrional de la provincia de El Cabo), aunque esta desapareció a mediados de los 80 (Power, 1986).

Más tarde, en 1990, *Pella Refractory Ores* inició una explotación en Modderfontein (18 km al NE de Garies). El yacimiento contiene más de 2 Mt, con una riqueza en mineral del 50 al 60 %. El beneficio, utilizando separación electrostática y magnética de alta intensidad y flotación, se esperaba que permitiese obtener 13.600 t/año de un producto de más del 90 % de wollastonita (Bauer et al., 1994).

El yacimiento fue adquirido por *Namaqua Wollastonite Pty. Ltd.*, en el segundo semestre de 1993, quien simplificó el procesado de la mina. En 1994 volvió a poner a punto la planta construida por *Pella Refractory Ores*, pues nunca trabajó a pleno rendimiento. La empresa obtiene wollastonita acicular con un ratio de 20:1

La producción inicial es de 100 t/año, distribuidas en los mercados locales como sustituto de asbestos, industria metalúrgica y carga en la elaboración de plásticos. Pequeñas partidas de la producción se dirigen hacia Turquía, Pakistán y Corea del Norte (Bolger, 1998).

Como en Namibia, *Namaqua* ha descubierto que el mercado sudafricano es aún muy inexperto en la utilización de la wollastonita y requiere un aprendizaje de cara al conocimiento de las aplicaciones del mineral (Fattah, 1994).

También existe en el país una planta de molienda de wollastonita en Gravelote, para procesar material que proviene del extenso cinturón de mármol con wollastonita de Damarland, en la vecina Namibia.

9.6.4.- MARRUECOS

La compañía *Morocco Minerals Co.*, de Casablanca, investigó hace unos años el yacimiento de Rommani. Las reservas probadas eran del orden de las 400.000 t, con un 34 % wollastonita y un ratio > 20:1.

En 1994 se habían extraído unas 220 t para muestras y ensayos analíticos, esperándose obtener un producto final con un 89.3 % de wollastonita que se utilizaría para la sustitución de asbestos. En esos momentos se estaban buscando socios para un "joint venture" (Fattah, 1994).

9.7.- AMÉRICA

9.7.1.- CANADÁ

Existe un considerable potencial para la producción de wollastonita en Canadá, particularmente en Ontario, Quebec y la Columbia Británica.

9.7.1.1.- Ontario

El yacimiento de wollastonita/calcita de Deloro, cerca de Marmora (190 km al este de Toronto), ha sido explorado y evaluado por un "joint venture" entre *Cominco Ltd.* y *Platinova Resources Ltd.* Presenta unas reservas de 2 Mt, con una riqueza del 40 % de wollastonita. Pruebas de flotación y de separación magnética han producido concentrados que contienen más del 90 % de wollastonita con ratios de 8:1.

Este yacimiento fue adquirido, posteriormente, por *Gitennes Exploration Inc.* de Toronto; quien, aparte de los 2 Mt de reservas probables conocidas, localizó 1 Mt de reservas posibles, con un 30 % wollastonita (variedad cerámica) y un 60-68 % de calcita. La compañía no pretendía explotar el depósito sino buscar socios para un "joint venture" (Fattah, 1994).

El yacimiento de Monte Grove, en Olden Township (este de Ontario), fue inicialmente investigado por *Ram Petroleum's Ltd. Drillig*; evaluándose 2.7 Mt de reservas, con una riqueza del 32 % de wollastonita, 63 % de calcita y 5 % de diópsido. La wollastonita presenta un alto ratio, que oscila entre 17:1 y 24:1. La producción planificada era de 30.000 t/año de wollastonita y 54.000 t/año de calcita (Harben & Kuzvart, 1996).

Posteriormente el yacimiento ha quedado en manos de una subsidiaria de *Ram Petroleum's Ltd.*, *Wollasco Minerals Inc.*, quien ha continuado el trabajo donde *Ram* lo dejó. Aunque en el yacimiento se ha obtenido un concentrado de alta calidad la empresa no ha sido capaz, hasta ahora, de alcanzar unos ratios de explotación adecuados. En el laboratorio se ha llevado a cabo un programa de ensayos del material del yacimiento y *Wollasco* quería construir una planta piloto en la zona de la mina, aunque no disponía de suficientes fondos.

La empresa ha estado negociando con el gobierno canadiense con el fin de conseguir algún apoyo financiero para construir una planta piloto a escala comercial. *Wollasco* estaba esperanzada con el hecho de que si esos fondos eran adjudicados próximamente podría iniciar la construcción de la planta piloto antes de finales de 1998 (Bolger, 1998), algo que no ha ocurrido.

La compañía cree que la calidad del material del yacimiento, que tiene un alto ratio (alrededor de 20:1), es lo bastante bueno como para competir satisfactoriamente con el material producido por los actuales productores que suministran producto de alta calidad a los mercados. Además cree que la presencia de

calcita junto a la wollastonita puede ser una ventaja, ya que con frecuencia los productores de wollastonita a menudo se quejan de la falta de carbonato cálcico asociado a la wollastonita. *Wollasco* confía en que existe un mercado para su material de alta calidad y alto brillo y de matriz calcítica.

El yacimiento de Seeley's Bay ha sido explorado y evaluado por *U.S. Borax Inc.*, de Raleigh (Carolina del Norte, EE.UU), propietaria de la mitad del yacimiento, quien ha identificado más de 9 Mt, con una riqueza del 41.3 % de wollastonita y otros 3 Mt con un 30 % de wollastonita. La composición final del material es del 35-80 % de wollastonita, > 30 % dióxido, 5-20 % feldespatos y 2-10 % cuarzo.

A pesar de estas cifras, la compañía ha decidido buscar comprador para su parte, dado el tamaño del yacimiento y las características del mercado (Fattah, 1994).

9.7.1.2.- Quebec

El yacimiento de Lac St. Jean, investigado por *Orleans Resources Inc.* de Montreal, contiene unos 5 Mt de reservas probadas (10.4 Mt probables y 12.1 Mt posibles) con una riqueza del 37 % de wollastonita y un ratio de 20:1 y requeriría flotación (Harben & Kuzvar, 1996). A finales de 1997 la compañía anunció que había completado la construcción de su nueva planta de procesamiento.

El inicio de esta explotación fue seguido con gran interés por muchos consumidores de wollastonita al tratarse de la primera explotación comercial de Canadá y la tercera en Norte América; sin embargo, no todo ha sido favorable para la *Orleans Resources*. Sólo un mes después de que se informase que la empresa había hecho su primer embarque comercial, la producción se suspendió debido a que la planta debía modificarse. Una pequeña parte de la demanda se ha ido atendiendo con el material en stock, durante el periodo inicial de la planta.

El plan original era que la planta de procesamiento produjese 50.000 t/año a partir del cuarto trimestre de 1998. Con la explotación aún suspendida a comienzos de octubre de 1998, era bastante obvio que esto no iba a poder conseguirse.

Como el inicio de la explotación se ha retrasado de forma considerable respecto a las expectativas iniciales de la compañía, ésta buscó, en el verano de 1998, diversas soluciones para restaurar su capital financiero. En septiembre de 1998 *Orleans Resources* anunció que estaba intentando presentar una propuesta a sus acreedores en conexión con una reestructuración de las finanzas de la compañía. *Orleans*, que el 30 de junio de 1998 presentaba un déficit de capital de 3.5 M\$C¹², está actualmente negociando el apoyo al desarrollo de su explotación con algunos inversores estratégicos. Todas las actividades del yacimiento han sido reducidas al mínimo, mientras que *Orleans* se esfuerza en vender toda la wollastonita que tiene en "stock". La compañía ha señalado, recientemente, que pretendía estar preparada para reanudar la producción de wollastonita tan pronto como la demanda se incrementase y su situación financiera se lo permitiese (Bolger, 1998).

Según nuestras noticias *Orleans Resources* ha reiniciado, a principios de 2000, sus actividades en la planta de transformación de la empresa.

9.7.1.3.- Columbia Británica

En las proximidades del Lago Wormy se han encontrado dos depósitos diferentes, ambos investigados por *Tri-Sil Minerals, Inc.*, de Vancouver. Uno de ellos se encuentra a unos 45 km al NO de Vancouver y el otro, denominado Mineral Hill, se haya en las proximidades de Sechelt (2.5 km al SE del Lago Wormy y a 1.5 km del mar). Este depósito presenta unas reservas de 290.000 t de wollastonita, con un 42 % de riqueza (variedad cerámica) y 70.000 t de granate.

¹² - \$C = Dólar canadiense

Finalmente, aún no hay noticias acerca del desarrollo del proyecto de *Whitegold Resources Corp.'s ISK*, en el área del río Iskut (Columbia Británica). A finales de 1997 la compañía dio por finalizado un estudio de previabilidad del yacimiento, pero en julio de 1998 se anunció que la compañía había contratado un consejero financiero para valorar una serie de opciones, entre la cuales estaba la venta total o parcial del proyecto.

9.7.2.- CHILE

En 1994 existía un único productor chileno, *Estudios y Proyectos Mineros Ltda. (EPROM)*, el cual producía wollastonita de alta calidad para uso cerámico en un yacimiento localizado a unos 60 km al NO de Santiago y a 50 km al E del puerto de Valparaíso.

En 1990 la producción fue de unas 500 t, distribuida en los mercados interiores de cargas, pintura y cerámica. En 1993 se produjeron 1.182 t de wollastonita, que se comercializaron con el nombre de **Silical**; de las que 550 t se consumieron en Chile y el resto se exportó a toda Sudamérica, desde Venezuela a la Tierra de Fuego (Argentina). La compañía esperaba aumentar su producción hasta alcanzar las 1.300 t y, con la expansión de los nuevos mercados, conseguir eventualmente un nivel de producción futura de unas 4.000 t que son las demandadas por los mercados sudamericanos (Fattah, op. cit.).

9.7.3.- CUBA

Fattah (1994) cita un yacimiento en las proximidades de Arimao (Cienfuegos), propiedad de *Geominera S.A.*, de La Habana, con unos 4.7 Mt de reservas probables. El yacimiento, que tiene un 45 % SiO₂ y 41 % CaO, se encontraba en evaluación, siendo viable su explotación en "joint venture".

9.8.- ASIA

9.8.1.- PAKISTÁN

En 1991 *Black Mountain (Pvt.) Ltd.*, establecida en Mansehra (provincia de la frontera Noroeste), pretendió obtener 32.000 t/año de wollastonita molida y en pellets de una mina cercana a Lashker y Qallah, en el distrito de Swat, que parecía disponer de unos 5 Mt de reservas. Sin embargo, la continuación de las actividades de *Black Mountain* se volvían inciertas (Fattah, 1994).

9.8.2.- COREA DEL NORTE

Existen referencias de que *Inphung Trading Corp.*, exportador de caolín y de concentrados de cobre, también ha exportado wollastonita a varios países, entre ellos a Japón, para diversos usos en prefabricados y cementos (Fattah, 1994).

9.8.3.- JAPÓN

En el pasado, dos productores nacionales suministraban de 10.000 a 15.000 t/año de wollastonita a la industria nipona de la cerámica y de las varillas de soldadura (Bauer et al., 1994).

9.9.- EUROPA

9.9.1.- GRECIA

Metallic Industrial Minerals Mevior, S.A., subsidiaria del *National Investment Bank for Industrial Development (NIBID)*, mediante la subvención de un Proyecto de Minerales Industriales de la UE exploró y llevó a cabo los estudios de procesamiento del yacimiento de wollastonita de Kimmeria (Tracia,

próximo a la frontera con Bulgaria). Los principales niveles del depósito tienen unos 8 m de potencia y contienen un 50-80 % de wollastonita, formada en un ambiente metamórfico. Las reservas varían entre 300.000 t (Bauer et al., 1994) y 700.000 t (Fattah, 1994), presentando ratios de 15:1-20:1.

Como minerales accesorios aparecen: grosularia (granate), diópsido y hematites micáceo; el cual, tras diferentes ensayos, pudo ser parcialmente eliminado por separación magnética por vía seca. Sin embargo el concentrado resultante tendrá que someterse a técnicas de flotación por espuma y a separación magnética por vía húmeda, para eliminar la calcita residual, el cuarzo y el diópsido que sobra, si el material quiere cumplir los límites especificados para la cerámica o las cargas (Power, 1986).

Durante 1991 la compañía planeó la construcción de una planta piloto en Assiros, con una capacidad de producción de 500 kg/h (Bauer et al., 1994). El proyecto se encuentra aún en fases iniciales de I+D pero, si la producción se inicia en el futuro, se buscarán para ella mercados cerámicos, tanto locales como internacionales (Italia y sur de Europa). El actual mercado griego de la wollastonita para vidriados y esmaltados sólo cuenta con unos pocos cientos de toneladas de material, aunque ello podría aumentar considerablemente si llegará a hacerse realidad la existencia de una explotación nacional.

9.9.2.- TURQUÍA

Aunque no hay referencias actuales acerca de producción de wollastonita en Turquía, han existido etapas donde sí las ha habido. La producción turca, proveniente de varios yacimientos superficiales fáciles de minar, ha sido siempre muy errática y de bastante bajo tonelaje. Las exportaciones sólo se materializaban cuando la producción aventajaba a la demanda local; sin embargo, en los últimos 20 años, la producción ha cesado debido a factores como: el agotamiento de los yacimientos, el incremento de los costos de producción a causa de la minería cada vez más profunda y la falta de I+D en minería, especialmente por parte de los productores cerámicos turcos.

El primer yacimiento explotable fue descubierto en 1958, cerca del pueblo de Serçeöron (en Kepsut, Balıkesir) y explotado por la compañía cerámica *Çanakkale Seramik*. Estos yacimientos tuvieron una producción relativamente importante durante los años 60 y 70, estando ahora abandonados.

Sin embargo el yacimiento más importante fue descubierto por Olcay Goksu (asesor de *Bilfer Mining Inc.*, de Ankara) durante principios de los 70, cerca del pueblo de Tahtaköprü (en Inegöl, Bursa). Las reservas probables eran de 1 Mt, con alta acicularidad, elevada pureza (un 70 % de mineral) y brillo bajo.

Para 1986, se planificó un programa de producción de 2.000 t/año (Power, 1986), siendo los mercados previstos los cerámicos, especialmente en Italia (Fattah, 1994). La composición química de la wollastonita del yacimiento queda reflejada en la Tabla 14.

La mayoría de los afloramientos están algo contaminados por ciertos minerales como: diópsido, granate, calcita, pirita y sulfuros de cobre. Las impurezas que contiene la wollastonita son de color gris-marrón y de cristales muy bastos, pero las pruebas de laboratorio han indicado que el material es válido para tejas y baldosas. Sin embargo es factible encontrar wollastonita más blanca y más pura, en forma más compacta y con granulometrías más finas. Una vez que la producción se inicie, el material grueso se separará a mano y se transportará, unos 11 km por autopista, hasta fábricas cerámicas locales y a una zona portuaria (Power, 1986).

Kalemadençilik Endüstriyel Hammaddeler SAn. ve Tic. AS, ubicado en Çanakkale (cerca de Estambul), es uno de los mayores productores cerámicos del país y produce una variedad pulverulenta de wollastonita para usos cerámicos. La empresa, que produjo unas 800 t de wollastonita en 1991, redujo su producción a unas 50 t en 1994, lo que parece indicar un abandono total del aprovechamiento del mineral (Fattah, 1994).

Tabla 14. Análisis tipo del mineral de Tahtaköprü

ELEMENTO	(%)
SiO ₂	47.95
CaO	47.50
MgO	0.78
Fe ₂ O ₃	0.58
Al ₂ O ₃	2.37
Na ₂ O	0.47
K ₂ O	0.14
TiO ₂	0.05
PPC	0.52

Fuente: Power (1986)

9.9.3.- SUECIA

Varias muestras de los yacimientos del centro de Suecia (una de Silverön y dos de Hulta-Gruvor) han sido utilizadas por el Istituto per il Trattamento del Minerali de CNR (CNR-ITM) de Italia para establecer nuevos métodos para el procesamiento de yacimientos de wollastonita con una composición mineral del tipo: wollastonita, feldespatos K y Ca-Na, vesuvianita, calcita y cuarzo.

El CNR-ITM ha desarrollado un nuevo sistema compuesto por una flotación inicial, para eliminar la vesuvianita y la calcita junto con una gran cantidad de minerales ferrosos, dentro de un circuito alcalino. Posteriormente se produce la flotación de los feldespatos K y Ca-Na en un circuito alcalino, tras acidificarlo, precipitando en la celda de flotación un residuo compuesto por wollastonita.

El método se desarrolló sobre un material que presentaba: 35 % de vesuvianita+calcita, 40 % de feldespato y 35 % de wollastonita, siendo posteriormente aplicado al material de Silverön, cuyas características eran: 60 % de calcita, 8 % de feldespato y 30 % de wollastonita

9.9.4.- SERBIA

En las proximidades del Monte Kopaonik, a unos 200 km al sur de Belgrado (Serbia), existe un yacimiento que contiene un 60-70 % de wollastonita, con cuarzo y calcita asociados. Las investigaciones geológicas han sido ejecutadas por un organismo de investigación gubernamental de Zagreb y el beneficio, a escala de laboratorio, ha producido concentrados con una proporción superior al 90 % del mineral (Bauer et al., 1994).

9.9.5.- REPÚBLICA DE CHEQUIA

El "todo-uno" que se obtiene en el yacimiento de Kladská-Lazy (cerca de Kynzsvart) contiene un 40-87 % de wollastonita. Este yacimiento se encuentra dentro de unas filitas con sericita y grafito cerca de su contacto con un granito del plutón de Karlovy Vary (Harben & Kuzvart, 1996).

9.10.- EX-URSS / RUSIA

Dada la extensión del territorio de la antigua Unión Soviética existen muchos depósitos de wollastonita susceptibles de ser explotados, aunque de momento no se conocen cifras de producción. A la hora de su estudio, los vamos a agrupar por su ubicación geográfica:

9.10.1.- ASIA CENTRAL

Se conocen más de 50 yacimientos de wollastonita, describiéndose a continuación los más importantes.

9.10.1.1.- Uzbekistán

El yacimiento de Koytash, situado en las Montañas Nuratau a unos 72 km al norte de Samarcanda y al SE del Mar de Aral (próximo a la frontera con Afganistán), presenta un contenido del 30-40 % de wollastonita, 30 % de calcita y pequeñas cantidades de feldespato, granate, diópsido, cuarzo, idocrasa y piroxeno (Power, 1986; Bauer et al., 1994).

El “todo-uno” se utilizó, por el Instituto de Investigación Científica para Geología y Yacimientos Minerales de Asia Central, en el desarrollo de un adecuado proceso de flotación. La wollastonita que se obtuvo mediante este proceso es utilizable para ciertos tipos de cerámica y se ha empleado en el ámbito doméstico.

A 113 km al sur de Samarcanda se encuentra el yacimiento de Lyangar. Aunque no se dispone de datos respecto al espesor o la extensión del mismo, se sabe que se trata de un yacimiento de gran tamaño, habiéndose utilizado la wollastonita de este depósito en la fabricación de cerámicos eléctricos (Bauer, et al., 1994).

9.10.1.2.- Tadjikistán

La wollastonita es común en el norte de Tadjikistán y allí se ha obtenido algo de producción del yacimiento de Kansay, a unos 29 km al norte de Leninabad. Este yacimiento es similar, en génesis y mineralogía, al de Lyangar descrito previamente.

9.10.1.3.- Kazajistán

El depósito de Bosaginski se encuentra a unos 270 km al sur de Karaganda, tiene 450 m de longitud y más de 70 m de anchura, extendiéndose hasta unos 270 m de profundidad (Santini, 1989). Ensayos de beneficio por vía húmeda han producido un material comercial de calidad pulverulenta y de alto ratio.

9.10.2.- ASIA ORIENTAL

En la República de Altai se cita un yacimiento de 1.2 Mt de reservas, con el 64.7 % de wollastonita y propiedad de la compañía moscovita *Bia* (Fattah, 1994). En marzo de 1995 la compañía irlandesa *Minmet PLC* adquirió el 75 % de la propiedad, desconociéndose cual es el estado actual de la situación.

9.11.- OCEANÍA

9.11.1.- NUEVA ZELANDA

El único yacimiento que se ha explotado en Oceanía ha sido una modesta explotación en Nueva Zelanda de *Mintech NZ Ltd.*, filial de *Newmans Group*. *Mintech*, en 1988, producía 500 t/año de una mina a cielo abierto en Takaka Hill (al noroeste de Nelson). Las reservas probables eran de unas 50.000 t, con wollastonita asociada a calcita, cuarzo y diópsido, aunque éste en pequeñas cantidades. El mineral era sometido a clasificación manual, machaqueo y molienda en una planta de procesamiento en Mapua, donde se obtenía un producto del 4 % retenido en 53 µm y se vendía con el nombre comercial de **WOL 18**. El 60 % de la producción se consumía en la industria de las baldosas cerámicas y el resto era vendido para reemplazamiento de asbestos y refuerzo o carga en plásticos (Power, 1986).

Debido a la mala ubicación del yacimiento respecto a los mercados globales del mineral *Mintech* vendió, en 1994, su depósito de wollastonita a una firma australiana sin desvelar.

En esas mismas fechas *Tesson Resources & Trading Pty. Ltd.*, de Motueka, reconocía un yacimiento de 60.000 t en South Island. A la vez que iniciaba la búsqueda de un socio para constituir un “joint venture” que permitiese verificar y desarrollar el depósito (Fattah, 1994).

9.11.2.- AUSTRALIA

Aunque Australia no tiene producción de wollastonita, se conocen una serie de depósitos en Queensland, Nueva Gales del Sur, Tasmania y Australia del Sur. *Adelaide Wallaroo Fertilizer Pty. Ltd.* ha investigado un yacimiento en Ethudna (NE de Australia del Sur), identificando unos recursos de 1 Mt, con un 40 % de wollastonita de contenido (Bauer et al., 1994).

10.- COMERCIALIZADORES Y PROCESADORES

Además de la distribución llevada a cabo directamente por los mismos productores de wollastonita, los comercializadores y procesadores tienen un importante papel en el mercado de este mineral, especialmente en Europa donde controlan un 40-50 % del mismo. Las empresas comercializadoras han sido un importante instrumento en la comercialización de la wollastonita de India y China, con precios muy económicos, jugando una baza importante en el establecimiento de los precios finales, sobre todo en los mercados de wollastonita de calidad más inferior (Fattah, 1994).

Ankerpoort NV, en Geertruidenberg (Holanda), produce unas 25.000 t/año de wollastonita a partir de pellets procedentes de China e India, la mayoría de esa cantidad es procesada como variedad de alto ratio aparente. La empresa produce tres tipos de producto: **Casiflux AA** para cerámica, pintura y plásticos, **Casiflux M** para aplicaciones metalúrgicas y **Casiflux F**, material de alto ratio aparente, empleada para paneles prefabricados de fibra y fibrocemento. *Ankerpoort*, que prefiere autodenominarse productor que procesador, también participa en el tratamiento de productos de *Vanderbilt* mediante su subsidiaria *Ankersmit Maalbedrijven BV*, también en Holanda

Quarzwerke GmbH, en Frechen (Alemania), produce más de 2.000 t/año de wollastonita tratada superficialmente, para su empleo en las industrias europeas de plásticos. La empresa produce dos productos principales: **Tremin 238** (3:1-5:1) y **Tremin 939** (10:1-30:1), a partir de wollastonita de China e India procesada por *Ankerpoort*.

Frank and Schulte GmbH, de Essen (Alemania), importa un reducido volumen de wollastonita china para los mercados de Europa y EE.UU.

Cookson Matthey Ceramics PLC (Reino Unido), un "joint venture" entre *Cookson Group PLC* y *Johnson Matthey PLC*, procesa en Italia wollastonita en bruto procedente de China, mediante *Cookson Matthey Italia SRL* y en Alemania mediante *Otavi GmbH*. En *Cookson Matthey Italia*, más de 8.000 t/año de wollastonita china son secadas y clasificadas a 200 y 350 mallas para utilizar, principalmente, en cerámica y metalurgia. Mientras, *Otavi GmbH*, produce wollastonita para uso metalúrgico.

De Bruyn SA (Bélgica) comercializa un volumen importante de wollastonita procedente de China, en forma procesada, para su empleo en metalurgia, cerámicas vidriadas, fritas y bases. *De Bruyn SA* planifica disponer, en 1995, de su propia molienda.

11.- WOLLASTONITA SINTÉTICA

La wollastonita sintética se obtiene mediante la calcinación de una mezcla de caliza (o mármol) con un lecho de sílice a 1.600 °C o, alternativamente, con una mezcla de caliza y diatomita a 1.000 °C.



La wollastonita sintética es de fibra corta (ratio de 3:1 a 5:1), siendo sus principales aplicaciones en la industria cerámica al presentar una temperatura de sinterización muy baja.

Las arcillas caoliniticas y la wollastonita son utilizadas en la producción de productos cerámicos de baja porosidad. La wollastonita proporciona piezas de gran resistencia y reduce la contracción en el secado. Por debajo de los 1.000 °C la wollastonita actúa como una fase inerte, pero por encima es un agente fundente (Lombardero et al., 1998).

Minerales sintéticos afines son: el dióxido (CaO·MgO·2SiO₂), también fabricado con dolomita-sílice y que facilita la sinterización en las cerámicas vitrificadas, polvo de modelado y soldadura y desulfurización metálica en caliente y la mayenita (12CaO·7Al₂O₃), obtenida a partir de productos con CaO y alúmina (desulfurización metálica en caliente, refinado de alúmina, modificación del acero bajo en sílice).

Tabla 15. Composición química de los silicatos sintéticos comerciales (%)

	WOLLASTONITA				DIÓPSIDO	MAYENITA	
	SW	SM	SE	SG	S	Baja en MgO	Enriquecida en MgO
	Muy baja en Fe	Baja en Fe	Baja en P/ S	Baja en P / S			
CaO	45.310	45.7	45.44	45.66	25.72	51.15	45.90
SiO ₂	53.590	52.6	52.36	52.58	55.68	2.90	2.70
MgO	0.470	0.6	0.61	0.55	16.37	0.75	4.60
Al ₂ O ₃	0.200	0.5	0.38	0.47	0.44	44.6	46.30
Fe ₂ O ₃	0.075	0.2	0.19	0.22	0.29	0.40	0.40
S	-	-	0.0034	0.008	-	- 0.04	- 0.04
P	-	-	0.0038	0.008	-	- 0.04	- 0.04
PPC	0.340	0.4	0.035	0.08	0.24	trazas	trazas

PPC (110-1.000°C)

Fuente: Rheinische Kalksteinwerke, Alemania

La mayoría de los productos sintéticos son hídricos y, a diferencia de la wollastonita natural anhidra, tienen una alta absorción. Toda la producción conocida está en forma de variedad pulverulenta.

Mientras que en las pasadas décadas se han producido avances significativos en la producción de la wollastonita, en el mundo de la wollastonita sintética se ha producido un importante aumento del I+D. Las aplicaciones actuales y potenciales de los silicatos cálcicos sintéticos son prácticamente los mismos que los de la wollastonita natural. El tonelaje de la wollastonita sintética producida anualmente es aún bajo, y sus precios son aproximadamente el doble de los de la wollastonita natural.

Entre los principales países productores de wollastonita sintética están Alemania, Bélgica, Dinamarca, Italia, EE.UU., Brasil, China, Japón y la ex-URSS (Bauer et al., 1994; Fattah, 1994; Zhang, 1996).

Tabla 16. Caracterización de la wollastonita sintética

	Variedad metalúrgica	Otras variedades
SiO ₂	≥ 48.00	≥ 52.00
Fe ₂ O ₃	≤ 0.50	≤ 0.80
CaO	≥ 44.00	≥ 45.00
Al ₂ O ₃	-	≤ 1.98
S	-	≤ 0.03
MgO	-	≤ 0.22
P	-	≤ 0.038
PPC	≤ 4.00	-
Tamaño	≥ 90.00 (0-100 mm)	10-200 mallas

11.1.- ALEMANIA

Problemas con el suministro de la wollastonita natural para su uso cerámico a principios de los 80, empujaron a *Dolomitwerke/Rheinische Kalksteinwerke GmbH (RKW)*, antigua productora de caliza y cal y establecida en Wülfrath, a fabricar wollastonita sintética en Alemania.

En 1983 *NYCO*, como parte de su estrategia para concentrar más producción en el mercado de las cargas, había parado la producción de su variedad de 200 mallas. Este súbito vacío en el mercado, fue magnificado a causa de ciertos problemas en el suministro del material finlandés.

La wollastonita sintética había sido elaborada, intermitentemente en Europa, desde principios de los 70 (Power, 1986), pero la mayoría de los productores tuvieron que cerrar a causa de su poca viabilidad económica. Sin embargo *Dolomitwerke*, en vista del reducido suministro y de los altos costos de la wollastonita importada, decidió que había llegado el momento para crear una fuente local viable para el mercado doméstico. La planta de producción se ubicó en la sede de la empresa en Wülfrath y la producción comenzó en octubre de 1984. Hoy día los principales productos de *RKW* incluyen: wollastonita, diópsido y mayenita sintéticos.

La producción es del orden de 10.000 t/año de polvo sintético que se comercializa con el nombre de **Wülfrath**. En función del contenido en Fe se generan cuatro variedades de 200 y 325 mallas: las de bajo contenido en Fe₂O₃, como la **SM** (< 0.21 %), la **SE** (0.18-0.30 %) y la **SG** (0.21 %) y la de muy bajo contenido en Fe, como es la **SW** blanca (< 0.07 %). Las variedades **SW** y **SM** se emplean en cerámica por su elevado brillo, mientras que las variedades **SE** y **SG** se emplean en metalurgia por su bajo contenido en P y S (< 0.01 %).

En cerámica, el tipo **SW** se utiliza ampliamente como base de calcio insoluble en agua, en esmaltes blancos o fritas esmaltadas, mientras, las variedades **SE**, **SG** y **SA** se usan en metalurgia por su insolubilidad en agua, baja PPC y baja fusión en bases cálcicas.

De los tres procesos de síntesis que podrían utilizarse teóricamente para la fabricación de wollastonita: sinterización, síntesis por reacción del estado sólido y cristalización en baño fundido, el utilizado por *RKW* es el de la sinterización.

La síntesis por reacción del estado sólido requiere una molienda intensa de las materias primas y una duración considerable del tiempo de reacción para llevarse a cabo; mientras que la cristalización de un silicato cálcico o calco-magnésico en un baño fundido, consume excesiva cantidad de energía térmica. Sin embargo, incluso cuando empleamos los métodos de sinterización, el alto grado de inversión técnica y económica en el proyecto restringe, comercialmente, la obtención de la wollastonita- β , que es característica del material acicular natural disponible en el mercado. Sin embargo mediante la sinterización a alta temperatura de una harina de cuarzo y un lecho de caliza fina, se puede obtener la fase mineral pseudowollastonita- α ¹³.

La wollastonita sintética cristaliza, de una mezcla homogénea de materias primas, en una relación molecular 1:1 cuando se calienta en un horno rotatorio a una temperatura inferior a la temperatura de fusión de la wollastonita. Aparece una fase fundida a través de la reacción con las materias primas, también ayudada por la adición a la mezcla de agentes fundentes. El proceso de cristalización es cuidadosamente regulado utilizando compuestos mineralizadores especiales y precisa de un control de la temperatura en la zona de calentamiento, donde la temperatura de formación de la wollastonita sintética es de alrededor de los 1.450 °C. El proceso de sinterización queda recogido en el diagrama representado en la Fig. 71.

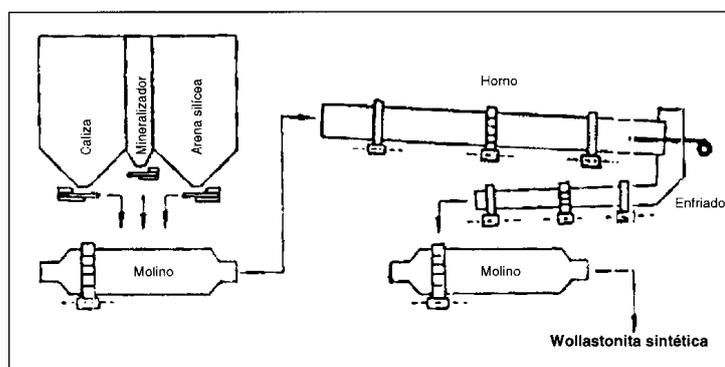


Fig. 71.- Esquema de la planta de producción de wollastonita sintética (según Power, 1986)

Las variaciones en la temperatura del horno pueden producir o una mezcla de “quemado blando”, en la que no toda la materia prima se ha convertido en wollastonita (por ej.: sílice libre) o, en el otro extremo, una mezcla donde todo se funde y solidifica rápidamente al salir de la zona de sinterización. El último fenómeno causa problemas, con la formación de revestimientos pesados en el horno, lo que requiere una pérdida de tiempo para su limpieza. Estos dos problemas ilustran la importancia que requiere el control de la temperatura del horno en el proceso.

Después de que la wollastonita sintética ha cristalizado en la forma pseudohexagonal se vuelca desde la zona de calentamiento del horno a un depósito de refrigeración y, acto seguido, a un molino para un nuevo proceso granulométrico.

¹³.- Ver el Aptdº. I: Mineralogía y propiedades físicas y químicas (N.A.).

11.2.- BÉLGICA

NV Promat S.A., una división de *Eternit Group*, produce un silicato cálcico hidratado sintético similar a la xonotlita $\text{Si}_6\text{O}_{17}\text{Ca}_6(\text{OH})_2$ (mineral del grupo de la rodonita, presente en Tetela de Xonotla, Méjico, y que presenta propiedades similares a las de la wollastonita). Este producto, comercializado como **Promaxon**, se produce a través de un proceso de cristalización patentado seguido del crecimiento controlado del cristal, para obtener partículas esféricas de 50-70 μm , las cuales tienen una estructura interna abierta rodeada por otra capa con una estructura cristalina cerrada.

El producto se utiliza en pinturas, sellantes y adhesivos como agente tixotrópico, en forros de frenos y otros productos de fricción, añadiendo un efecto refrigerante en la frenada y controlando las altas temperaturas, así como en plásticos y caucho reforzando la carga. En otras aplicaciones se utiliza como agente fluidificante y separador.

11.3.- DINAMARCA

Los metasilicatos cálcicos sintéticos producidos en Dinamarca a partir de arena silicea y creta, que es muy abundante en ese país, son comercializados bajo la denominación de **Synopal**.

La creta y la arena son mezcladas con pequeños contenidos de dolomita que actúa como fundente. La mezcla es calentada en un horno a unos 1.560 °C, formando una pasta viscosa que es posteriormente enfriada con agua. Cuando la mezcla se solidifica, el material es machacado, tamizado y, posteriormente, vuelto a calentar en un segundo horno a 1.250 °C para facilitar la cristalización. El producto final es subangular, blanco, opaco y compuesto de un 50 % de wollastonita y un 50 de gehlenita ($\text{SiO}_7\text{Ca}_2\text{Al}_2$) y akermanita ($\text{SiO}_7\text{Ca}_2\text{Mg}$).

Los usos del **Synopal** abarcan desde superficies de carreteras, mosaicos cerámicos y piezas para techar y solar.

11.4.-OTROS

11.4.1.- ITALIA

En Italia se obtiene un producto sintético denominado **Wollanita**, mediante el calentamiento de una mezcla de arena silicea, creta y dolomita, que se utiliza como material para carreteras, como abrasivo y en cerámica. Los métodos de producción son similares a los utilizados en Dinamarca.

11.4.2.- ESTADOS UNIDOS

Tanto los metasilicatos hídricos como anhidros son fabricados en los EE.UU. bajo la denominación de **Silene** por *PPG Industries* y de **Micro-Cel** por *Meanville Products Corp.* Muchas variedades de estos productos se obtienen al introducir una mezcla de cal, arena silicea y dolomita en un horno autoclave, a alta presión y temperatura.

11.4.3.- BRASIL

Energycarc produce unas 500 t/año de wollastonita sintética a partir de cuarzo y calcita, siendo a la vez el principal distribuidor de *NYCO* en Brasil. A raíz de la adquisición de Hermosillo por *NYCO*, *Energycarc* ha reducido significativamente su producción sintética y se ha concentrado en la distribución del producto natural.

-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
IV.- APLICACIONES Y MERCADOS
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-

12.- PRINCIPALES APLICACIONES

La wollastonita comenzó su desarrollo a finales de los 70 y principios de los 80 como sustituto de los asbestos de fibra corta, desde ese momento el consumo mundial de wollastonita se ha doblado.

En función de la acicularidad de la partícula del mineral, el mercado de la wollastonita se divide en dos tipos principales:

- producto no acicular o de bajo ratio (LAR = Low aspect ratio): wollastonita de categoría pulverulenta o molida, con un ratio de 3:1 a 5:1 y que se utiliza como cargas en general, en cerámica y en fundentes metalúrgicos.
- producto acicular o de alto ratio (HAR = High aspect ratio): presenta ratios entre 15:1 y 20:1 y se utilizan como cargas funcionales para refuerzos en compuestos polímeros termoplásticos y termosellantes y como sustituto de asbestos.

En general, los mercados de producto molido se basan en la composición química del mineral, mientras que los mercados de alto ratio se basan en la acicularidad física de la wollastonita. El mercado principal de la wollastonita es el cerámico, seguido por los plásticos, sustitución de asbestos, metalurgia, pinturas y revestimientos. Para algunas aplicaciones, la wollastonita es modificada químicamente para aumentar su rendimiento.

En la variedad molida, la composición de la wollastonita (Tabla 17) suministra una fuente tanto de CaO como de SiO₂ y aporta cualidades únicas como carga, tales como favorecer el bajo coeficiente de expansión térmica y la baja resistencia al choque térmico. La wollastonita también puede mejorar la intensidad del vidriado y el acabado superficial en vidrios alcalinos, a la vez que ser un sustituto de alguno de sus componentes: feldespato, sílice o caolín.

En este sector, los principales mercados son los cerámicos (40-45 % del consumo total) y el del sector metalúrgico (12-15 %). La wollastonita molida se distribuye por numerosos países a granel y a un precio inferior al de la wollastonita de alto ratio.

Tabla 17. Composición química "tipo" de la wollastonita de calidad comercial

ÓXIDOS	(%)
CaO	43.00-47.70
SiO ₂	49.50-53.00
Fe ₂ O ₃	0.20-0.40
MgO	0.10-0.80
Al ₂ O ₃	0.20-1.00
TiO ₂	0.00-0.02
PPC	0.50-2.10

Fuente: Bolger (1998)

Respecto a la otra variedad, una wollastonita de alto ratio (generalmente 10:1 a 20:1) refuerza y mejora la carga funcional en numerosas aplicaciones, fundamentalmente en los plásticos y cauchos (19-25 % del consumo total), sustitutos de asbestos en la construcción y en productos refractarios (20-25 %) y en

pinturas y revestimientos (2-5 % del consumo total), En estas aplicaciones la wollastonita aporta dureza, resistencia a la flexión y al impacto, mejorando las propiedades eléctricas y aumentando la estabilidad calorífica y dimensional de los plásticos.

Hasta que el producto indio llegó a los mercados, *NYCO* era el único productor de wollastonita acicular. Esto no sólo producía un virtual monopolio en los EE.UU., sino que sirvió para proteger las exportaciones durante la recesión y el periodo de fluctuación del cambio del dólar durante 1984-1985. Sin embargo con la llegada del mineral indio, altamente acicular, y con la producción de la variedad micronizada de *Partek* y *R.T. Vanderbilt* la competencia, en ciertas áreas del mercado especialmente en las de “grano largo”, se incrementó fuertemente.

La acicularidad, la dureza, la blancura y su estructura inerte, desde el punto de vista químico, son propiedades requeridas para cargas en pintura, caucho, plásticos, adhesivos y abrasivos cerámicos.

La estructura acicular de la wollastonita aporta una serie de propiedades positivas al mineral, aumentando su dureza y su resistencia a la flexión y al impacto. En los plásticos, el aporte de wollastonita mejora las propiedades eléctricas del producto, creando un material con mejor respuesta al calor y de gran estabilidad dimensional. Estos plásticos de alta calidad se están convirtiendo en uno de los sectores de mayor crecimiento para los productores de wollastonita. En pintura, por ejemplo, las partículas aciculares de la wollastonita actúan como agentes aislantes que permiten extender la pintura después de la aplicación, para conseguir una ligera película de espesor uniforme. El entrelazado de las partículas aciculares aporta tenacidad y durabilidad así como una excelente retención al tinte, junto con una mayor resistencia al rozamiento y a los agentes atmosféricos.

Su alto brillo (84-93 %) y blancura reduce la carga de pigmento, y su baja absorción al aceite reduce sus necesidades de ligante, reduciéndose por ello el coste del pigmento. En los plásticos, tableros y paneles, la estructura acicular de la wollastonita aumenta la resistencia al impacto, y su resistencia a la tensión y a la flexión. Por ello los tableros y los paneles son a prueba de fuego, con unas buenas propiedades de amortiguación acústica.

12.1.- CERÁMICA

Desde el inicio del aprovechamiento de la wollastonita en el condado de Essex (Nueva York) en los años 50, la industria cerámica ha sido el principal mercado de la wollastonita por volumen de material. La mayor importancia la ha conseguido a partir de la implantación de técnicas de cocción rápida que reducen el consumo energético y, sin embargo, aumentan la productividad.

En 1993 los mercados cerámicos consumieron unas 150.000 t de wollastonita, lo que representa el 42 % de la producción total de este mineral. Dado que el mercado está muy estabilizado, sólo se esperan crecimientos en Europa y EE.UU., aunque relativamente pequeños. Si embargo, una vez que la situación económica de Asia se vuelva a recuperar, la industria cerámica de la región podrá tener un aumento en la demanda del 5 % anual.

Las siguientes propiedades, físicas y químicas, ilustran el efecto beneficioso de la wollastonita en los materiales cerámicos y en los procesos de esmaltado:

- Acicularidad del cristal

- Contribuye al refuerzo mecánico, a la solidez de la base cerámica y mejora la calidad de la homogeneización y la compacidad natural, para permitir nuevas técnicas de mecanización.

- Proporciona, al producto cocido, alta resistencia al impacto y estabilidad dimensional.
- Aporta buenas propiedades acústicas a las superficies del azulejo.
- Son mejorados los tiempos de secado en los azulejos y en los ladrillos, gracias a la naturaleza alargada del cristal que actúa como un canal para el paso rápido del agua y de ese modo se reduce la expansión de la humedad.

- Expansión térmica

- La wollastonita tiene un bajo coeficiente de expansión térmica lineal lo que reduce la contracción y otras inestabilidades dimensionales tales como: agrietamiento, microfisuras, envejecimiento y defectos en el esmaltado.

- Pérdida por calcinación (PPC)

- La wollastonita generalmente muestra valores de PPC < 1 %, lo que proporciona una generación gaseosa mínima durante la cocción, especialmente cuando se compara con el volumen de gas que se genera al utilizar productos más tradicionales empleados en cerámica, tales como carbonatos y minerales hidratados.
- Como el mineral se funde con un mínimo de burbujas, esto proporciona a una superficie lisa con disminución del número de poros.

- Pureza química

- Dado que las impurezas de Fe, Ti y Mn son mínimas, el mineral mantiene en la cocción su alta blancura.
- La ausencia de álcalis también contribuye a proporcionarle excelentes cualidades como aislante eléctrico.
- El mineral tiene una baja temperatura de sinterización, alrededor de 991-1.196 °C, similar a la de la mayoría de las fritas naturales y funde fácilmente con alúmina y sílice. Por consiguiente el mineral es más idóneo para técnicas de cocción rápida.
- El aporte de CaO a los procesos de esmaltado alcalino proporciona resistencia al esmalte, acabado de la superficie y, en la proporción correcta, un acabado mate en esmaltes de baja cocción.

La mayor proporción se emplea como bases y vidriados en azulejos y baldosas, utilizándose una parte menor en sanitarios, loza y otros productos más especializados. También se emplea la wollastonita para mejorar los riesgos de agrietamiento, deformaciones, roturas y defectos de vidriado. Los procesos de cocción rápida han revolucionado los tiempos de cocción de las piezas cerámicas, pero el rápido crecimiento de la producción ha traído asociado problemas de índole física y química. El choque térmico, el incremento de la mecanización y la disminución de la fase gaseosa desprendida durante la cocción, han contribuido a las nuevas demandas que se les están pidiendo a las materias primas cerámicas empleadas en estos procesos.

La wollastonita, 100 % sólida, libre de agua y con una despreciable pérdida por calcinación, facilita el brillo de los esmaltes al minimizar la liberación de gases que pueden originar microburbujas en la cocción. También puede mejorar el acabado de la superficie de los vidriados y actuar como sustituto de la cal y de la sílice, debido a que entre sus componentes hay CaO y SiO₂.

En las fritas la wollastonita se emplea en aquellos casos donde su bajo punto de fusión, de aproximadamente 1.500 °C, es más bajo que el de la base; mientras que en fritas esmaltadas, ayuda a dar un mateado final y a estabilizar colores y tintes. En las porcelanas esmaltadas actúa como una económica frita natural, eliminando la necesidad de realizar la precocción con caliza y sílice.

En las bases cerámicas, que pueden contener hasta el 50 % de wollastonita, la acicularidad del mineral completa y mejora las propiedades mecánicas de las vajillas, reduciendo las torsiones y roturas de las

bases de combustión rápida. Facilita la fusión de la sílice y la alúmina a temperaturas relativamente bajas y minimiza la expansión térmica, fracturación, agrietamiento y contracción, mientras que favorece la cocción rápida a bajas temperaturas. La sustitución del 1 % al 3 % de wollastonita por sílex y/o fundente en bases semivítreas, disminuye la contracción y la expansión del agua, reforzando la consistencia de la base. En otras aplicaciones cerámicas, la wollastonita sustituye el 2-5 % de feldespato y cuarzo en bases vitrificadas, para rebajar la temperatura de vitrificación y reducir las contracciones.

En el campo de los azulejos y los vidriados o esmaltes, la wollastonita ha hecho un considerable esfuerzo en el mercado como refuerzo, dimensionalmente estable y aditivo de baja producción gaseosa, lo que ha hecho que se la haya utilizado, en algunos campos, como sustituto de los materiales más tradicionales para uso cerámico, tales como el blanco de España, la dolomita, el talco y el feldespato.

12.1.1.- BALDOSAS CERÁMICAS

Tras el pasado vuelco de la economía mundial (1992-1994) y acompañando el incremento de la construcción y al desarrollo, los mercados de azulejos cerámicos han visto desarrollarse un importante crecimiento, preferentemente en los EE.UU. y Asia

La producción mundial de baldosas cerámicas en 1995 alcanzó los 2.900 Mm². Hasta la reciente y repentina aparición de China (15 % de la producción mundial), Italia (19 %), España (12 %) y Brasil (11 %) solían compartir el liderazgo de la producción mundial. Estos cuatro países, junto con Alemania, son también los líderes en consumo; si bien en Italia y España la producción dobla al consumo interno, lo que demuestra su formidable capacidad de exportación.

La cuota del mercado mundial española se mantiene constante entre un 12-14 %, debido a que su industria de baldosas cerámicas ha adquirido el reconocimiento internacional por su excelente combinación de precio, calidad y diseño.

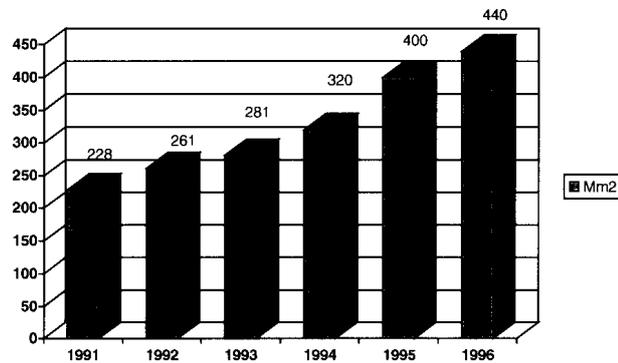


Fig. 72.- Producción nacional de baldosas cerámicas (según Marchán Sanz et al., 1998)

La Fig. 72 muestra el extraordinario desarrollo de la industria de la baldosa cerámica española durante el sexenio 1991-1996, con una producción de 400 Mm² en 1995 y de 440 Mm² en 1996 y un valor de 2.500 M\$. El aumento de la producción española de baldosas cerámicas ha sido paralelo al aumento de la producción mundial: 25 % en 1995 y 6 % en 1996. La capacidad de producción teórica de baldosas cerámicas en España es de 462 Mm², lo que significa que actualmente se encuentra al 95 % de su capacidad máxima.

España es el segundo exportador mundial de baldosas cerámicas. Las exportaciones han crecido de manera constante y en 1996 España exportó 192 Mm², casi la mitad de su producción, con un valor en el mercado de 1.369 M\$. En 1995 este capítulo representó el 1.48 % del total de las exportaciones españolas.

La Tabla 18 resume las exportaciones españolas de baldosas cerámicas por continentes, siendo Europa y Asia los principales destinos de nuestros productos.

Tabla 18. Exportaciones españolas de baldosas cerámicas (en % de las ventas totales)

	1995	1996	% del total
Europa	90.7	93.7	48.3
América	25.3	26.1	14
Asia	57.1	57.4	29.7
África	13	14.3	7.4
Oceanía	2.4	1.8	0.8

Fuente: Modificado de Marchán Sanz et al. (1998)

Las importaciones experimentaron una considerable reducción en 1996 al alcanzar un valor de 19 M\$, cuando en 1995 se obtuvieron 23 M\$.

Actualmente hay en España unas 220 empresas que producen baldosas cerámicas, de las cuales 180 están organizadas industrialmente. El 80 % de dichas empresas, que representan el 90 % de la producción nacional, están concentradas en la provincia de Castellón (Municipios de Alcora, Onda, Castellón, Vilarreal, Nules, San Juan de Moró y Villafamés).

Tabla 19. Principales productores españoles de baldosas cerámicas

Empresa/Grupo	Producción (Mm ²)	Facturación (M\$)
<i>Porcelanosa</i>	15	202
<i>Apereci</i>	12	95
<i>Taugres</i>	10	84
<i>Pamesa</i>	8.8	83
<i>Gres de Nules/Keraben</i>	8	71
<i>Grespania</i>	6	53
<i>Marazzi</i>	-	51
<i>Saloni</i>	6	48
<i>Zirconio</i>	5.1	44
<i>Vives Azulejos y Gres</i>	6.5	42
<i>Todagres</i>	5.3	41
<i>Gres de Valls</i>	4.7	37
TOTAL	27.6	851

Fuente: Modificado de Marchán Sanz et al. (1998)

El 35% de la facturación del sector está capitalizado por doce grandes grupos industriales situados en la Comunidad Valenciana (ver Tabla 19), que exportan el 57 % de su producción y representan el 80 % de la producción nacional de baldosas cerámicas, siendo líderes mundiales en calidad e innovaciones técnicas y estéticas.

Este subsector crea 16.800 puestos de trabajo directos y a otros 4.000 indirectos. La compañía media tiene 80 trabajadores y las tres cuartas partes de las empresas tienen menos de 100 empleados.

Las ventas totales en 1996 fueron de 2.415 M\$, con un aumento del 2.74 % respecto a 1995.

El 93 % de la producción española de baldosas cerámicas son pavimentos y revestimientos esmaltados. El restante 7 % son pavimentos cerámicos sin esmaltar, incluido el gres rústico y el porcelánico cuya demanda continúa en aumento.

Las baldosas cerámicas españolas se diferencian de las producidas en otros países en las siguientes características:

- **Conformado:** El prensado en seco representa el 94 % de la producción total, el resto (6 %) se fabrica por extrusión.
- **Color rojo:** 88 % de las baldosas cerámicas se producen con pastas rojas. Sólo un 12 % se produce con pastas de cocción blanca.
- **Formatos grandes** tanto para pavimentos, con tamaños superiores a 50 x 50 cm, como para revestimientos con tamaños superiores a 25 x 40 cm. Esta última característica es el resultado de las extraordinarias mejoras que han alcanzado, en los procesos productivos, las empresas españolas.

El empleo de baldosas cerámicas en pavimentos o en revestimientos depende de sus características técnicas. Así las baldosas porosas (10-18 %) se suelen utilizar en revestimientos, mientras que los soportes de baja porosidad (> 3 %) se emplean en pavimentos. Aunque la actual producción española es de un 50 % revestimientos y un 50% pavimentos, la tendencia general parece indicar un crecimiento de los pavimentos. La Fig. 73 refleja la evolución de la producción española en función del proceso de calcinación, destacando los cambios que se han producido en el sector a finales de los ochenta.

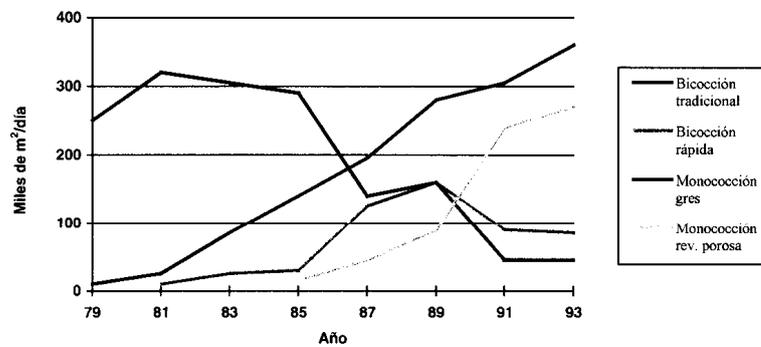


Fig. 73.- Evolución de la producción española del sector cerámico en función del proceso empleado (según Marchán Sanz et al, op. cit.)

A nivel mundial no se publican estadísticas de producción de arcillas, salvo en el caso de los caolines y de arcillas especiales (bentonita, attapulgita, sepiolita), y sólo algunos países occidentales dan detalle de su extracción de arcillas más comunes. A título indicativo, en la Tabla 20 se recoge la producción de arcilla común, refractaria y "ball clay" de EE.UU., Reino Unido, Alemania y España, durante el quinquenio 1993-1997.

País	Tipo de arcilla	1993	1994	1995	1996	1997
EE.UU	común	25.300	25.900	25.600	26.200	24.500
	refractaria	459	458	583	505	649
	ball clay	911	1.050	993	935	1.040
Reino Unido	común	10.891	12.464	13.930	-	-
	refractaria	479	679	708	-	-
	ball clay	746	825	893	-	-
Alemania	común y refract.	47.800	42.000	31.000	30.000	
España	común	13.978	12.867	15.275	16.409	17.082
	refractaria	81	95	107	95	106
	caolín bruto	101	143	203	314	316

Fuentes: Marchán Sanz et al. (1998)

En EE.UU., con el 57 % del mercado cubierto por la importación, el Departamento de Comercio indica que el consumo de la industria de azulejos aumentó el 13.6 % en 1993, pasando de 94 Mm² en 1992 a 107.6 Mm² en 1993. Las partidas internas aumentaron el 4.9 %, pasando de 44 a 46 Mm² y aumentando las importaciones el 21 %, desde 50.2 a 61 Mm². El consumo de azulejo cerámico se espera que continúe su crecimiento un 3-4 % durante 1994, alcanzando unos 111.5 Mm², estimándose que este nivel será el segundo mayor alcanzado nunca por los EE.UU.

Aunque el incremento de la demanda se atribuye principalmente al auge de la construcción, los azulejos han visto aumentado su crecimiento debido a la aceptación del material en aplicaciones en zonas residenciales.

También en Sudamérica, Oriente Medio y Sudeste Asiático los mercados de azulejos cerámicos se incrementan, como lo demuestra el aumento de su capacidad con la instalación de nuevas plantas de producción en Indonesia, Arabia Saudí, Israel y África del Norte.

El mercado europeo de wollastonita en polvo se estima en unas 50.000 t/año proveniente de diferentes fuentes. Este mercado podría incrementarse sustancialmente si el material tuviese un precio más competitivo que los materiales tradicionales, tales como el carbonato cálcico, talco, etc. Sin embargo, incluso considerando que el uso de la cocción rápida está incrementándose y muchos de los productores cerámicos se están reconvirtiendo a este tipo de proceso de alta producción, la mayoría de los suministradores de wollastonita no prevén crecimientos particularmente fuertes en este mercado.

Los mercados de mayor volumen de wollastonita se encuentran, o se esperan encontrar, en aquellos países con una alta producción cerámica, tales como Italia, España, Alemania, y Portugal. Estos países se han caracterizado, en el pasado reciente, por inversiones a gran escala en las líneas producción de cocción rápida y de cocción sencilla y consumen variedades de wollastonita del orden de las 200 a 325 mallas.

Muchos suministradores han lamentado la falta de ventas al Reino Unido, porque la industria cerámica continúa utilizando antiguas técnicas de cocción en vez de invertir en las más nuevas y costosas tecnologías que están siendo utilizadas en Europa. Pasará aún algún tiempo antes de que el Reino Unido se convierta en un importador fuerte de wollastonita, pues muchos productores encuentran soluciones para la cocción mediante grandes suministros internos de arcilla y caliza, sin utilizar la wollastonita para sus esmaltes y mezclas. En la actualidad, la mayoría de la wollastonita utilizada en la industria cerámica del Reino Unido proviene de los EE.UU y, en menor cantidad, de Finlandia.

Se utiliza relativamente poca cantidad de wollastonita en bases cerámicas, aunque existen ciertas excepciones a causa de los precios relativamente bajos o de las prácticas tradicionales, tal es el caso de Italia, Alemania y Finlandia. En Alemania algunos productores de loza gastan más del 10 % del total del producto en mejorar las características de cocción y la apariencia general. En Finlandia aproximadamente la mitad de la producción doméstica se utiliza en la industria local del azulejo, el cual se beneficia de la proximidad al suministro y de los mínimos costes de transporte, lo que le permite economizar un 50 % de su costo.

En la década de los 80 la wollastonita china empezó a introducirse en los mercados cerámicos de Italia y Alemania, encontrando una buena aceptación. En la mayoría de los casos el material se traía a Europa en crudo, donde era machacado y molido por diferentes agentes procesadores. La mayoría de los críticos del mineral chino señalan que cuando los suministros provienen de minas de la provincia de Jilin, el control de calidad no queda asegurado. El mayor problema con este material era su, variable y, relativamente alta, pérdida por calcinación (PPC); pues normalmente presentaba valores próximos al 3 %, aunque ha llegado a alcanzar cifras superiores al 8 %. Sin embargo, gracias a una cuidadosa y controlada molienda y a técnicas de mezcla, se podía obtener un producto aceptable y útil para la industria cerámica italiana y como aditivo en polvo para la fundición alemana.

Se estima que, procedentes de suministradores chinos, llegaron a Europa unas 7.000-10.000 t de mineral en crudo a finales de 1984. Siendo unas 4.000 t, con un tamaño de 325 mallas, las que llegaron a Italia en 1985 para ser consumidas por el sector cerámico. El consumo total de wollastonita en Italia, considerando tanto las importaciones chinas como las procedentes de EE.UU., era del orden de las 9.000-10.000 t/año.

Las cifras referentes a España son similares, 6.000 t durante 1999, pues aunque el incremento del empleo de técnicas de cocción rápida facilite una mayor utilización del mineral, aun existe un gran número de fabricantes de cerámica bastante escépticos ante la innovación que supone el uso de la wollastonita, pues están plenamente suministrados de materias primas más baratas y más tradicionales en la industria cerámica.

12.2.- CARGAS EN PLÁSTICOS, RESINAS Y CAUCHOS

El mercado que ha sufrido un crecimiento más rápido ha sido el de los plásticos, con porcentajes actuales del 25 % del total de la demanda y siendo uno de los que poseen aplicaciones de más alto valor para la wollastonita.

Los pronósticos acerca del crecimiento de este sector varían entre el 5-10 % del global; con algunos campos, como el de ciertas resinas, donde se esperan alcanzar crecimientos próximos al 20 % anual.

A continuación se citan aquellas propiedades mineralógicas de la wollastonita que aportan efectos beneficiosos para su utilización en los termoplásticos (PVC, nylon, PP) y en las resinas térmicas (epoxy, fenólica, polyester):

- Acicularidad del cristal
 - La estructura del cristal refuerza el incremento medio de la resistencia al impacto, a la tensión y a la flexión.
 - Los valores de dureza del mineral, relativamente altos, aumentan la resistencia al deterioro, aunque esto puede causar problemas de abrasión en las operaciones de extrusionado.
 - Su alta tolerancia dimensional reduce la contracción.
- Propiedades de absorción
 - Muy bajo poder de absorción de agua en comparación con otras cargas minerales.
 - Posible alta carga debido a su baja absorción plástica.
 - Baja viscosidad y alta carga.
 - Compatibilidad con los plásticos orgánicos, aumentada por el revestimiento superficial químico de los granos.
- Características de color
 - El alto brillo y la blancura del mineral, junto con sus propiedades de opacidad, ahorran costos de pigmentación.
 - Superficies finales lisas con alto grado de resistencia a las manchas, debido a su bajo poder de absorción de agua.
- Propiedades eléctricas
 - Muy buen aislamiento eléctrico debido a sus bajos niveles de impurezas. En el polipropileno (PP) a un 40 % de carga le corresponde una constante dieléctrica de 2.74.

Las propiedades de refuerzo de la wollastonita, su baja absorción de agua, su estabilidad y conductividad térmica, su baja demanda de resina y su pureza química hacen de ella una carga popular en un amplio espectro de aplicaciones, desde las de la industria del automóvil a la aeroespacial.

Tabla 21. Aportaciones de la wollastonita a los plásticos reforzados

NYLONS

- baja absorción de agua
- límite industrial para las variedades hojosas
- precio económico en la sustitución del vidrio molido
- mejora el flujo de moldeo
- distribución uniforme del calor
- mejora la estabilidad dimensional
- mejora las características superficiales
- aumenta la temperatura de distorsión de calor
- mejora las propiedades mecánicas
- reduce el espesor de la pared

COMPUESTOS FENÓLICOS DE MOLDEO

- baja demanda de resina

- mejora la eliminación de la humedad
- aumenta las cargas; buen flujo en cargas altas
- disminuye el tiempo de ciclo de moldeo
- aumenta el refuerzo
- precio económico en la sustitución del vidrio molido
- aumenta la mecanización de las partes moldeadas
- baja absorción de agua
- aumenta la resistencia a la compresión
- excelente estabilidad dimensional
- mejora las propiedades físicas y eléctricas a temperatura elevada

POLIESTER

- reducción de la viscosidad
- baja absorción de agua
- mejora el acabado superficial
- excelente estabilidad calórica
- mejora la resistencia a la flexión
- mejora las propiedades de aislamiento eléctrico
- precio económico en la sustitución del vidrio molido

POLIURETANO / POLIUREAS

- precio económico en la sustitución del vidrio molido en RRIM
- mejora el acabado superficial (distinción de imagen)
- disminuye la viscosidad
- más anisotropía que con el vidrio molido
- bajo coeficiente de expansión térmica
- baja absorción de agua
- reducción del combado con el calor
- reducción de costos

La wollastonita aporta numerosas aplicaciones tanto en los templados, donde la acción de enlaces químicos cruzados evitan que el plástico se deforme a altas temperaturas, como en los termoplásticos. Los principales consumidores termoplásticos de wollastonita son las poliamidas, tales como el nylon 6, el nylon 6/6, el poliéster, los polímeros cristalinos líquidos y las resinas mecánicas; mientras que los principales consumidores termosellados son los compuestos fenólicos de moldeo, epóxidos, poliuretanos, poliurea, y los poliésteres no saturados como el BMC, SMC y RTM. Las cargas de wollastonita en la industria del plástico afectan al nylon (50 %), polietileno de baja densidad (40 %), polipropileno (23-28 %) y poliestireno (30 %).

Como es común en otros mercados de cargas, la wollastonita se utiliza principalmente como una alternativa más barata a otras cargas, tales como la fibra de vidrio corta, la mica y el talco. Así, mientras que sus propiedades son importantes, su precio juega un papel aún más importante en su demanda.

En función de los diferentes tipos de termoplásticos, las aportaciones de la wollastonita quedan recogidas en la Tabla 21.

No obstante, y a pesar de lo dicho anteriormente, el productor o el exportador de plástico/resina asumirá las ventajas de la wollastonita siempre que el precio de la misma sea competitivo con el de las cargas minerales más tradicionales del mercado. La Tabla 22 muestra una serie de sustancias empleadas como cargas minerales y las propiedades que aportan a la mezcla termoplástica.

Tabla 22. Influencia de las cargas en los termoplásticos

	<i>Asbesto</i>	<i>Caolín</i>	<i>Esferas de vidrio</i>	<i>Mica</i>	<i>Sílice</i>	<i>Talco</i>	<i>Wollastonita</i>
Estabilidad térmica		+		+	+	+	+
Aumenta el aislamiento térmico	+	+		+		+	+
Aumenta la conductividad térmica	+				+	+	+
Módulo de elasticidad	++		+	++	+	+	++
Reduce la contracción	+	+	+	+	+	+	+
Reduce la expansión térmica	+	+		+	+	+	
Resistencia a la compresión			+			+	
Resistencia a la tensión	+		+	+		O	
Resistencia al impacto	-	-	-	-+	-	-	-
Resistencia eléctrica		++		++	+	+	+
Resistencia química	+	+	+	+		O	+

++: influencia considerable +: influencia menos pronunciada O: sin influencia -: influencia negativa
 Fuente: Gächler & Müller (1983)

En la Tabla 23 se recogen los diferentes volúmenes de las distintas sustancias empleadas como cargas en el sector de los termoplásticos.

Tabla 23. Demanda de cargas minerales en el sector de los termoplásticos (1995)

CARGA MINERAL	VOLUMEN (t)
Carbonato cálcico	1.100.000
Talco	90.000
Caolín	15.000
Sulfato de bario	12.000
Wollastonita	9.000
Mica	5.000

Fuente: Bolger (1998)

12.2.1.- TRATAMIENTO SUPERFICIAL

El tratamiento superficial o recubrimiento superficial de la wollastonita ha llegado a ser uno de los mejores métodos existentes para mejorar su rendimiento como carga mineral, contribuyendo también a incrementar el valor añadido del producto. El tratamiento aporta al producto un aumento en su grado de dispersión, haciéndose más compatible y reactivo con el polímero, obteniéndose así plásticos más duros y resistentes.

En un típico sistema de resina cargada, la adhesión entre la resina y la carga se fundamenta en un débil enlace físico. Como resultado, la interfase entre el mineral y la resina se hace más débil cuando el plástico sufre esfuerzos; siendo, a menudo, el punto débil por donde el plástico rompe. El tratamiento superficial se efectúa para mejorar el vínculo carga-resina que permite la formación de un fuerte enlace covalente

entre el mineral y la resina, mejorando la rigidez del plástico, su resistencia y capacidad, así como la resistencia al calor mientras que permite aumentar la capacidad de carga en ciertos plásticos.

El tratamiento superficial también mejora las propiedades de fusión de la resina, disminuyendo la presión de inyección plástica y mejorando la fusión de la resina en el molde. El tratamiento superficial químico más frecuente, generalmente referido a agentes de enganche o húmedos, incluye estearatos, silanos (tales como el aminosilano, epoxisilano, metacrililano, metilsilano y vinilsilano), zircoaluminatos y titanatos

Los silanos aumentan la cohesión entre el medio y la carga, mejoran las altas prestaciones y, así, incrementan el número de aplicaciones del producto. En la mayoría de los usos como carga, la interfase grano-medio representa el punto más probable de debilidad. Esto puede agravarse si el material de carga no ha sido totalmente revestido por el medio o ha sido sometido a una desigual dispersión. Estas líneas de debilidad pueden ser muy bien aprovechadas por los esfuerzos mecánicos o la infiltración de agua o de otras sustancias que pueden así disminuir las características físicas y eléctricas.

Sin embargo con los cristales alargados de wollastonita plenamente revestidos, mediante tratamientos químicos superficiales idóneos, existe una tendencia del material a orientarse según el flujo de resina/plástico y de ese modo mejorar grandemente la resistencia a la tensión. El revestimiento químico también ayuda a reducir la abrasibilidad de los cristales, lo cual es especialmente importante en los procesos de extrusionado, para proteger las superficies del molde.

Los titanatos, por ejemplo, reaccionan con los protones libres en la interfase inorgánica de la carga, formándose capas orgánicas monomoleculares en la superficie inorgánica. Normalmente, el titanato tratado orgánicamente tiende a ser hidrófobo, organófilo y organofuncional y así mejorar su dispersabilidad enlazándose con la fase polimera. También los titanatos mejoran la resistencia al impacto del plástico, el alargamiento de la vida de las propiedades mecánicas del plástico, reduciendo la viscosidad de la mezcla resina-carga por debajo de la del polímero virgen.

Actualmente, sólo *NYCO*, *Partek* y *Wolkem* producen mineral tratado superficialmente, así como ciertos procesadores, incluyendo a *De Bruyn* y *Quarzwerke*. Mientras que grandes procesadores, tales como *United Minerals Corp.*, en Malvern (Arkansas), también tratan superficialmente la wollastonita previo pedido.

Los efectos de la wollastonita en las propiedades del tratamiento de los plásticos quedan recogidas en la Tabla 24, tanto para variedades tratadas como no tratadas.

Tabla 24. Variación de las propiedades de los plásticos en función de si están o no tratados químicamente		
PROPIEDAD	SIN TRATAR	MODIFICADO QUÍMICAMENTE
Viscosidad	Aumenta	No varía o incremento moderado
Flujo de fundido	Disminuye	No varía o disminución moderada
Temperatura de procesado	Disminuye	No varía o varía muy poco
Presión de inyección	No varía o descenso ligero	No varía o descenso ligero
Flujo de moldeo	Reducción moderada	No varía o ligera mejora
Contracción en el moldeo	Disminuye	Disminuye
Tiempo del ciclo de moldeo	Disminuye	Disminuye

Fuente: Bauer et al. (1994)

En la mayoría de los componentes plásticos se utiliza wollastonita modificada químicamente por el productor, o se aporta el tratamiento químico "in situ". Los beneficios de la wollastonita modificada

químicamente (u otros minerales modificados químicamente) en comparación con las variedades no tratadas son:

- mejora la dispersión mineral y la facilidad para cubrir superficies
- desaglomeración / reaglomeración
- mejora el tratamiento
- mejora la relación polímero-mineral
- mejora las propiedades eléctricas
- mejora las propiedades mecánicas
- reduce la sensibilidad al agua del compuesto final

Existen también ventajas para utilizar minerales premodificados en vez de aquellos que han sufrido un tratamiento “in situ” o han tenido una adición integral, tales como:

- propiedades consistentes del compuesto y características de manejo de un grupo al siguiente
- desarrollo de propiedades críticas eléctricas y de resistencia, en húmedo
- viscosidades de fundido bajas y por consiguiente, características de flujo mejores
- eliminar las necesidades de ajuste de nivel químico de una formulación a otra
- susceptibilidad reducida al diseño de equipos de procesado
- susceptibilidad reducida a la secuencia de añadir componentes a la fórmula
- amplio procesado
- mejoras económicas

La industria mundial de los plásticos representa el mercado clave para el crecimiento de la wollastonita modificada químicamente.

12.2.2.- PLÁSTICOS DE AUTOMÓVILES

La industria del automóvil es una de las de mayor crecimiento para el mundo de los plásticos, pues al reducirse el peso de los vehículos se aprovechan al máximo la eficacia del combustible y se reducen las emisiones peligrosas. El uso de los plásticos en los automóviles también ayuda a reducir los costos en la herramienta, mucho más bajo que las de metal. En algunos casos, por ejemplo, el costo de la herramienta de plástico es una cuarta parte de la de aluminio o acero.

Actualmente la proporción de plásticos usados en los nuevos automóviles es alta, ya que la mayoría de los vehículos producidos hoy día utilizan plásticos en sus componentes. El vehículo actual contiene unos 100-150 kg de plástico, reduciéndose así su peso hasta en un 25 % del de hace una década.

12.2.3.- PIEZAS MOLDEADAS DE INYECCIÓN REFORZADA (RRIM)

Los plásticos de automóvil han demostrado ser uno de los mercados más importantes para la wollastonita, donde se utiliza como refuerzo. Así, la mayor utilización del mineral ha sido en piezas moldeadas de inyección reforzada (RRIM), tales como salpicaderos y paneles.

En la década de los 70 un gran empuje para mejorar la eficacia del sector del automóvil se dio por parte de *General Motors*, al comenzar a producir partes externas de vehículo con menos peso y resistentes a la corrosión. La sustitución de piezas de pesado acero por otras de plástico, mucho más ligeras, comenzó con los cambios de estilo que supuso el reemplazar el acero del parachoques por un frontal de plástico que hacía más agradable la línea del vehículo.

Cuando comenzó originalmente la investigación las piezas se formaban mediante un moldeo de inyección (RIM), proceso que se basaba principalmente en el poliuretano donde los isocianatos reactivos y los polialcoholes se combinan con monómeros líquidos y se inyectan en un molde durante la fase líquida. Dependiendo de la naturaleza de los reactantes, la reacción de los dos monómeros proporciona

de hecho, ha demostrado ser su mayor ventaja de cara a los mercados del automóvil de Europa, Japón y EE.UU. que sufren fuertes presiones ecologistas para utilizar materiales reciclables en sus productos.

Los TPO son mezclas de polipropileno, monómero de propileno y etileno o caucho de propileno, combinados con polietileno y aditivos para formar plásticos con una variedad extremadamente amplia de propiedades físicas, dando una gama desde blandos y flexibles a muy fuertes y rígidos. Los TPO también presentan elevada resistencia al impacto, buena resistencia química, excelentes propiedades eléctricas y bajo peso específico de 0.9-1.1 (comparado con el más elevado del RRIM, de 1.15 o mayor)

Por otro lado, incluso con la intrusión de los TPO en la industria del automóvil, aún hay infinidad de plásticos que se utilizan en la fabricación de coches y camiones para los que las cargas, tales como la wollastonita, son una parte importante. En particular las poliamidas, el nylon 6 o el nylon 6/6 son utilizados en materias plásticas de la zona del motor del vehículo. La adición de wollastonita a estos materiales mejora su resistencia a la tensión y a la flexión y aumenta sus propiedades de desviar el calor y facilita la relación de moldeo. Otras aplicaciones del nylon cargado de wollastonita son las cubiertas de las ruedas y sus componentes decorativos.

En las aplicaciones del automóvil los TPO son populares por su bajo precio, facilidad de procesado y buena adaptación a las inclemencias climáticas, usándose preferentemente en la fabricación de radiadores, alerones y parachoques. Una ventaja añadida es su capacidad para permitir la coloración del moldeo, lo que es mejor que pintar la superficie, aunque la inconsistencia resultante del proceso ha obligado a los fabricantes de coches a pintar sobre los plásticos de todos modos.

No obstante, el futuro crecimiento del uso de la wollastonita en los TPO no es muy halagüeño. De acuerdo con *D&S Plastics*, los TPO requieren concentraciones significativamente más bajas de refuerzo que los RRIM, debido a su dureza y rigidez. Además, la compañía ha excluido la utilización de la wollastonita en sus productos, sacrificando sus buenas prestaciones como carga a causa de su alto coste y ha optado en cambio por cargas más baratas. Como consecuencia, la mayoría de los TPO han permanecido sin cargar o han sido cargados con talco un 2 % del peso.

Sin embargo *NYCO*, cuyos esfuerzos en marketing han jugado un gran papel en la ampliación de la wollastonita en los RRIM, está planificando introducir un nuevo producto de wollastonita revestida para su uso en los TPO. *NYCO* está esperanzada en que la nueva generación de TPO será un importante consumidor de wollastonita, dado que la reducción del coeficiente de expansión térmica de la wollastonita supera al del talco.

12.2.5.- POLIAMIDAS - NYLON 6 Y NYLON 6/6

En otros mercados del plástico se utiliza wollastonita de alto ratio en el nylon 6 y en el nylon 6/6, ya que mejora la resistencia de flexión y tensión y el módulo de flexión, así como el índice de resistencia al calor, reduciendo el coeficiente de expansión térmica y facilitando la separación del molde. La wollastonita con baja absorción de agua, es una ventaja añadida para los nylons.

Las principales aplicaciones de la wollastonita en los nylons cargados son en capotas de automóviles, herramientas mecánicas caseras y elementos relacionados con la jardinería. Diversas variedades de wollastonita han sido utilizadas en combinación con fibra de vidrio triturada para aportar resistencia al nylon. Así los productos de *NYCO*, **NYAD G** y **G Wollastocoat** se han empleado en las manecillas de las puertas del Taurus sedán de *Ford Motor Co.*

También se ha empleado en el cromado de los tapacubos y de los componentes decorativos. En este caso, la wollastonita se utiliza donde se requiere uniformidad en el tamaño de partícula, buena dispersión de la carga y consistente resistencia a los ataques químicos, para obtener buenos ciclos térmicos y fuerte adhesión del cromo.

12.2.6.- OTRAS APLICACIONES

Las wollastonitas tratadas superficialmente o no, se emplean en la sustitución de asbestos en compuestos moldeados fenólicos para aplicaciones de refuerzo. Se utiliza en la producción de una amplia variedad de productos, desde los más sofisticados (inyectores y ojivas de cohetes) a los más comunes (asas de ollas, pastillas y cojinetes de frenos y conectores electrónicos).

También se emplea en moldeados de epoxy y de componentes fundidos, especialmente en componentes eléctricos, cerámicos y revestimientos pulverulentos: para reducir la transmisión de vapor de agua, reducir costes, mejorar las propiedades eléctricas y la resistencia al choque y reducir la contracción. Por razones similares también se emplea en diversas resinas técnicas incluyendo ABS, PET/PBT, PPS, PPO y aleaciones. Finalmente, en moldeados de láminas de poliéster sin saturar y moldeados en bruto, la wollastonita reemplaza a la fibra de vidrio triturada para mejorar el flujo espiral, el envejecimiento a largo término y aumentar el brillo superficial del plástico.

En la industria química china, la wollastonita de alta calidad se utiliza para sustituir parcialmente al TiO_2 en pinturas, caucho, plásticos y otros productos blancos. El método desarrollado por *Lishu* para aplicaciones en caucho y plástico, consta de un núcleo de wollastonita en polvo superfino tras acoplamiento, recombinación, calcinación y modificación. Este nuevo tipo de pigmento blanco se utiliza en la producción de cauchos y plásticos de colores claros. Por lo tanto la wollastonita reemplaza al polvo de la anatasa (TiO_2) con un costo que es la mitad o la tercera parte de aquella.

12.2.7.- SITUACIÓN MUNDIAL

El principal productor de EE.UU. *NYCO*, con un 50-60 % de su producción consumida en los mercados estadounidenses, está siguiendo una política activa de marketing para promocionar el uso de su producto *NYAD* como carga en el lucrativo mercado de los plásticos, donde se requieren características de reforzamiento. Las ventas están alrededor de 8.000-10.000 t/año, con un crecimiento anual del 10-12 %, presentando muy buenas perspectivas para el futuro. Desde que muchas aplicaciones, como los sistemas termosellados y termoplásticos, requieren algún grado de tratamiento superficial químico, esto ha originado considerables incrementos del valor añadido a los productores del mineral. Mientras que el producto acicular *NYAD G* se vende a 220 \$/t, la wollastonita tratada superficialmente puede variar de 550-990 \$/t, dependiendo de la calidad de mineral utilizado y tipo y grado del tratamiento superficial empleado.

La Tabla 25 muestra el valor añadido que se genera sobre el precio, en los EE.UU, por el tratamiento químico superficial de varios minerales utilizados como carga.

Tabla 25. Evolución del valor añadido en diferentes cargas minerales al ser tratadas químicamente (EE.UU)		
Mineral	Mineral sin modificar (\$/t)	Mineral modificado (\$/t)
Alúmina hidratada	265-770	550-1035
Caolín	45-310	460-505
Carbonato cálcico natural	65-220	175-265
Mica	175-460	465-615
Sílice natural	65-330	240-595
Talco	110-285	285-485
Wollastonita	90-485	550-1100

Fuente: Power (1986)

R.T. *Vanderbilt* también está tomando un activo interés en el mercado europeo y ya ha establecido una planta de tratamiento en Holanda, para procesar la wollastonita bruta que es fletada desde los EE.UU. Utilizando técnicas especializadas de molienda, la mayoría de los granos aciculares son capaces de liberarse intactos, produciéndose así un material de alto ratio. Sin embargo R.T. *Vanderbilt* ha estado tradicionalmente más relacionado con los mercados de polvo en los EE.UU., los cuales están principalmente interesados en la industria cerámica, que consume alrededor del 60 % de la producción total de la compañía en la forma de **VANSIL W-10** (un 97 % < 200 mallas). El resto está repartido en otros dos tipos, el 2 % > 325 mallas y el 0.05 % > 325 mallas que se consume en plásticos, pinturas y fundentes de varillas de soldadura.

El mayor potencial de crecimiento de la wollastonita en Europa, parece estar en la utilización del material altamente acicular como sustituto de los asbestos y como carga de refuerzo en plásticos y resinas (O'Driscoll, 1993; Jones, 1997; de Decker, 1999). Esta utilización requiere un material con un tamaño de malla bastante grande y un ratio del orden de 15:1 a 20:1. De momento estos mercados están sólo abiertos a *NYCO* y *Wolkem*, e incluso con técnicas especiales de molienda es improbable que R.T. *Vanderbilt* y *Partek*, de los productores actuales, sean capaces de capturar una proporción significativa de este mercado, debido a la naturaleza de la materia prima. Mientras, la wollastonita china y la sintética están restringidas al mercado del polvo.

Lo que más anima a los productores de wollastonita, aunque pensando en el mercado europeo no está suficientemente claro, es la utilización de la wollastonita acicular como carga de altas prestaciones en diversos procesos para plásticos y resinas, cuya utilización está aumentando en todos los aspectos de la vida diaria. El potencial de este mercado ha llevado a productores de polvo, tales como *Partek* y R.T. *Vanderbilt*, a investigar en equipamientos sofisticados de molienda y tecnologías de revestimiento químico para así incrementar la naturaleza acicular de sus productos y hacerlos más atractivos de cara a los mercados de los plásticos y las resinas.

12.3.- REEMPLAZAMIENTO DE ASBESTOS

El incremento de la legislación sanitaria sobre el uso de los asbestos en diversas aplicaciones, debido a su cancerogeneidad (clasificados, como Clase 1-Carcinógeno Conocido, por la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer-OMS). Afecta principalmente a Europa y EE.UU., pero aún quedan países donde se sigue utilizando el asbesto y que son potenciales objetivos para los productores de wollastonita.

El concepto de sustituto de los asbestos no es nuevo. La primera gran campaña para desarrollar sustitutos de los asbestos se inició por EE.UU en los años 40, ya que siempre ha dependido de fuentes exteriores para obtener asbesto de calidad estratégica: Canadá, Rusia, China, Zimbabwe, Kazajstán. Durante la II Guerra Mundial, el gobierno norteamericano fue consciente de que estos suministros se cortarían con el devenir de los años.

Los asbestos para uso estratégico eran imprescindibles para muchos aislantes eléctricos y térmicos: separadores de placas de batería, tableros ignífugos, aislamientos para componentes de cohetes, etc. También se requería un suministro eficaz de asbestos del tipo no estratégico, para aplicaciones generales civiles y militares, tales como frenos, pedales de embrague y materiales de construcción. El gobierno no sólo inició una mayor investigación acerca de los yacimientos de asbestos del tipo estratégico, sino que también estudió la posibilidad de sintetizar asbestos en el laboratorio y desarrollar productos que no

contuviesen asbestos estratégicos. Estos esfuerzos, así como aquellos que se llevaron por parte del sector privado, fueron generalmente decepcionantes.

A finales de los 60 y principio de los 70 comenzó la segunda gran campaña para desarrollar sustitutos para los asbestos, ya que la sociedad conocía la amenaza que para la salud suponía la liberación de sus fibras durante el procesamiento, utilización, colocación y reparación de productos que contuviesen asbestos y, además, el problema medioambiental que suponía su emisión. Se dictaron normas medioambientales que, con el tiempo, se fueron haciendo cada vez más estrictas. La combinación del incremento de medidas ambientales cada vez más restrictivas, junto con la madurez de algunos mercados de asbestos y la realización de ensayos de riesgo, empujaron a muchos fabricantes a parar sus líneas de producción e investigar en sustitutos de los mismos. Como resultado, el uso de los asbestos ha declinado drásticamente.

El primer paso que se toma en el desarrollo de un sustituto de asbestos es determinar la propiedad o propiedades de los asbestos que son importantes para una aplicación concreta. El siguiente paso es encontrar un sustituto que se aproxime lo más posible a esas propiedades, examinar como el sustituto afecta a los procesos de fabricación y decidir si las propiedades suministradas al producto final por el sustituto hace competitivo en costo y en funcionamiento el producto resultante,

Tabla 26. Materiales fibrosos contra no fibrosos	
FIBROSOS	NO FIBROSOS
Fibra de aramida	Biotita
Attapulgita	Silicato cálcico
Fibra de carbono	Diatomita
Fibra de celulosa	Polipropileno fibroso
Fibra cerámica	Grafito
Fibra de vidrio	Moscovita
Fibra Franklin	Perlita
Fibra de nylon	Serpentinita
Palygorskita	Sílice
Fibra de poliacrilonitrilo	Talco
Fibra de polibenzimidazol	Vermiculita
Fibra de polietileno (PE fibroso)	
Fibra de polipropileno (PP fibroso)	
Fibra de politetrafluoretileno (PTFE fibroso)	
Fibra de alcohol de polivinilo	
Sepiolita	
Fibra de acero	
Wollastonita	
Lana mineral	

Los materiales en negrita son los utilizados más comúnmente como sustitutos de los asbestos
Fuente: Virta (1992)

Los materiales valorados por los fabricantes para ser utilizados como sustituto de los asbestos pueden dividirse en: sustitutos minerales frente a sustitutos orgánicos, sustitutos fibrosos contra sustitutos no fibrosos y sustitutos naturales contra sustitutos sintéticos (Tabla 26). Los fabricantes también consideran la utilización de productos alternativos en lugar de asbestos o sustitutos de asbestos.

Los minerales que han sido evaluados como sustitutos de los asbestos son: attapulgita, biotita, grafito, moscovita, palygorskita, serpentina, sílice, talco, vermiculita y wollastonita y se pueden emplear en la manufacturación de diversos productos (Tabla 27).

Tabla 27. Productos elaborados y sustitutos de asbestos utilizados	
AISLAMIENTO	fibra de vidrio, fibra cerámica, silicato cálcico , cemento
CARTÓN	minerales no fibrosos, wollastonita , fibra cerámica
CINTAS	celulosa, cinta de uretano, cinta basada en carbono
EMBASES	fibra de vidrio, fibra de carbono, grafito, fibra de aramida, celulosa, fibra cerámica, PTFE, mica
FORROS DE TUBERÍAS	minerales no fibrosos, revestimiento de uretano, revestimiento plástico
FRICCIÓN	frenos semimetálicos, fibra de vidrio, fibra de aramida, fibra mineral, fibra de acero, celulosa, fibra Franklin
LÁMINAS DE FIBROCEMENTO	polipropileno fibroso, silicato cálcico , cemento, fibra de vidrio, fibras de celulosa, fibra mineral, fibra cerámica, plástico reforzado con fibra de vidrio acanalada, PVC acanalado, cemento armado con fibra de vidrio, láminas de vinilo, láminas de aluminio
PAPEL	fibra de vidrio, fibra cerámica, celulosa
PLÁSTICOS	fibra de vidrio, PTFE, mica, wollastonita , porcelana, polvo de sílice ahumado, fibra Franklin
REVESTIMIENTOS	celulosa, película de PE, fibra cerámica, arcillas, talco, caliza, wollastonita , fibra de vidrio, fibra de carbono, fibra de PP, aramida, fibra de PE
SUELOS	fibra de vidrio, compuestos de vinilo, arcilla, pulpa de PE, talco, fibra cerámica
TEXTILES	fibra de vidrio, fibra cerámica, fibra de carbono, fibra de aramida, PBI
TUBERÍAS DE FIBROCEMENTO	hierro dúctil, tubería de PVC, cemento pretensado, tubería de cemento armado

Fuente: Virta (1992)

La constatación, durante los últimos 20 años, de los problemas de salud que produce el asbesto, ha supuesto un nuevo mercado para la wollastonita al convertirse esta en un importante sustituto de los asbestos de fibra corta, dada la naturaleza acicular de sus fibras, su bajo coeficiente de expansión térmica y su resistencia al choque térmico. En ese tiempo se ha duplicado su aplicación, tanto por los costes de aquélla como por su utilización como refuerzo en distintas aplicaciones. Además del crecimiento habido en la industria del plástico, también se produce un aumento notable a partir de su aplicación en la elaboración de materiales resistentes al fuego, paneles y cementos, productos de fricción, etc. donde se había utilizado antiguamente el asbesto.

Se consumen unas 35.000-40.000 t de wollastonita de alto ratio en construcción y en la fabricación de paneles aislantes, sustituyendo a los asbestos como refuerzo en un campo que les ha sido propio. La wollastonita se emplea tanto en interiores como en exteriores: paneles prefabricados, tejas, tableros de pizarras, chapas de paredes, así como en paneles aislantes utilizados en el control de altas temperaturas

(pueden soportar temperaturas > 760 °C). La mayoría de estos productos suelen estar formados por silicatos cálcicos o por fibrocementos. En este caso, la wollastonita es un importante sustituto por su estabilidad térmica, sus propiedades de refuerzo, su relativo bajo peso y sus buenas propiedades acústicas, al tiempo que puede aportar dureza y solidez a los productos y sus superficies (Fattah, 1994).

BNZ Materials Co., en North Billerica (Massachusetts, EE.UU) utiliza una importante cantidad de wollastonita en la elaboración de paneles aislantes. En la planta de Billerica se producen paneles de silicato de calcio con el nombre de **Marinite**, capaces de aguantar temperaturas de hasta unos 800 °C y que se funden con aluminio y otros metales no ferrosos. También se emplean estos paneles en la construcción (puertas aislantes) y en paredes para hornos.

Un volumen importante de wollastonita se utiliza como refuerzo en aplicaciones de alta temperatura, donde no es útil la fibra de vidrio. Según indicación de *BNZ*, las redes de los metasilicatos de calcio aportan estabilidad térmica y dureza a los paneles que por otro lado podrían deshacerse a altas temperaturas.

De forma similar en Europa *Eternit Group*, el gigante de productos de la construcción, consume varios miles de toneladas de wollastonita, añadidas a un importante volumen de **Promaxon** sintético para la producción de paneles prefabricados para la construcción y paneles aislantes.

La wollastonita también constituye un importante producto como aditivo en la obtención de productos de fricción, pastillas y forros de frenos, embragues y similares. En EE.UU., la composición de los productos de fricción ha sustituido los asbestos por paquetes de fibra basados en wollastonita de alto ratio junto con otras fibras orgánicas y metálicas, aportando la wollastonita dureza, alta conductividad térmica y uniforme distribución del calor. En algunas aplicaciones, como en las pastillas de freno fenólicas, la wollastonita de alto ratio y con superficie modificada puede reducir hasta el 70 % del peso. Normalmente estos productos son más duraderos, aportan buena mecanización y limitan los efectos de corrosión de los líquidos de frenos en comparación con las típicas pastillas metálicas. Fuera de EE.UU. la wollastonita también se está empleando, por las razones indicadas, en la fabricación de juntas.

De acuerdo con *Motion Control Industries* de Ridgeway (Pennsylvania, EE.UU), quien consume en productos de fricción unas 1.680 t/año de wollastonita procedente tanto de India como de EE.UU., la wollastonita se utiliza como refuerzo y como aditivo para mejorar el coeficiente de fricción, junto con otras cargas y aditivos.

En los últimos 10 años, y tras un considerable esfuerzo, China ha desarrollado wollastonita de alto ratio en polvo. El consumo anual sobrepasa las 40.000 t/año de wollastonita acicular y es vendida íntegramente a Japón. El polvo acicular es mayoritariamente utilizado en paramentos ignífugos y en fibrocementos.

China Huanqiu Minerals Co. Ltd., fundada por *Sino-Korea Cooperation* en Dalian, procesa polvo de wollastonita acicular que ha sido evaluado por Eternit Test and Inspection Centre de Bélgica. Los resultados han demostrado que el producto ha alcanzado unos límites suficientes como para ser utilizado en paneles ignífugos, en lugar de ciertos productos elaborados con asbesto (Zhang, 1996).

12.4.- FUNDENTES METALÚRGICOS

Dado que la wollastonita es un fundente natural de baja temperatura, se han desarrollado un alto número de aplicaciones en el fundido del acero y en soldaduras. Debido a la utilización de los procesos de fundido continuo en las industrias del acero europeas, se ha desarrollado un mercado en crecimiento para la wollastonita como fundente, empleándose en las cadenas de fundición continua de acero.

Cuando el acero fundido es vertido desde el fondo del cazo de refinado al molde refractario, se añade un fundente en polvo (constituido por wollastonita) a la corriente continua de metal derretido. Esta práctica mantiene la superficie del flujo en estado fundido, minimizándose así los defectos superficiales, tales como las discontinuidades que se hubiesen podido formar durante el vertido, previene la oxidación de la superficie del acero, lubrica las paredes del molde y absorbe las inclusiones no-metálicas.

El fundente con wollastonita se añade para mejorar las superficies finales del acero que pueden ser acabadas mediante compuestos de sílice y cal. Los polvos de soldadura también utilizan grandes tonelajes de wollastonita como fundente y como aditivo a la formación de escorias. La wollastonita es empleada para mejorar la combustión y como inhibidor de chispas en soldadura, debido a sus características intrínsecas de fundente. Además debido a su baja pérdida por calcinación, la wollastonita reduce las posibilidades de microagrietamiento y rotura, y la pureza del mineral prevé la adición de trazas de P o S que pueden reducir la resistencia del metal.

En las aplicaciones metalúrgicas de la wollastonita se tiende a utilizar la variedad de mineral de más baja calidad, siendo el mercado de más bajo valor. No se valora para nada la acicularidad o el brillo, aunque es importante que la wollastonita tenga un bajo contenido de fósforo y azufre, para evitar contaminar la mezcla de fundición y obtener así un acero de baja resistencia. La wollastonita utilizada en este tipo de aplicación tiende a ser la menos procesada y es vendida, generalmente, como mercancía en bruto.

Los mercados metalúrgicos han sido los primeros en ser invadidos por la wollastonita más económica procedente de China e India. En Europa, por ejemplo, la wollastonita china ha capturado casi 2/3 partes del mercado de polvo para fundición, mientras que en EE.UU. comenzó a introducirse en 1994.

Aunque algunos consumidores discuten sobre el grado de calidad de los embarques de wollastonita china respecto a la uniformidad del tamaño de partícula, de cara a su uso en aplicaciones metalúrgicas, el hecho es que Alemania, con su floreciente industria del acero, importa cerca de 10.000 t/año de wollastonita de *Lishu Wollastonite Mining Corp.* Las exigencias de calidad son estrictas y el contenido en álcalis es: $\text{SiO}_2 > 49\%$, $\text{CaO} > 44.5\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0.5\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 > 0.8\%$ y una limitación estricta del S/P.

Durante la primera mitad de 1998 la industria del acero en los EE.UU. se ha mantenido en un alto momento de forma, lo que ha sido positivo para los productores de wollastonita de calidad metalúrgica; sin embargo, a partir del verano, la industria inició un descenso de la demanda y de la producción.

El mercado metalúrgico es el segundo mayor en utilización de wollastonita en Europa, lo que supone un 30 % estimado del mercado total de polvo, aproximadamente unas 10.000 t/año. En Alemania, donde esta aplicación está más desarrollada, el consumo se estima que es del orden de las 6.000-8.000 t/año.

Como el mercado en la industria cerámica está ya muy estabilizado, muchos productores son optimistas respecto al futuro crecimiento en el área metalúrgica.

12.5.- PINTURAS Y REVESTIMIENTOS

La wollastonita ha sido utilizada intensamente en pinturas y revestimientos. El uso de la wollastonita en revestimientos comenzó a principios de los 50, cuando el material de alto brillo de Willsboro (Nueva York) fue introducido en el mercado de los EE.UU. Este material fue rápidamente adoptado, en la década de los 60, por la industria de los revestimientos de EE.UU. como cargas y extensores en una amplia variedad de revestimientos y, a finales de la década, las ventas de wollastonita se incrementaban en una

proporción del 10 % anual. En ese momento, la wollastonita era el único extensor acicular totalmente blanco y con unos ratios que oscilaban entre 3:1 y 20:1.

Para su empleo en pinturas se utilizan las siguientes propiedades:

Forma de la partícula	Tamaño de la partícula (µm)	Peso específico	Absorción de aceite (g/100 g)	Índice de refracción
acicular	45-150	2.90	20-33	1.63

- Acicularidad del cristal

- Las partículas como agujas actúan como un buen agente de aplanamiento y facilitan a la pintura asentarse después de la aplicación, para obtener una fina película de espesor uniforme.
- El entrelazado de las partículas mejora la tenacidad y durabilidad del revestimiento con una excelente retención de tinte y resistencia al lavado y a la alteración.

- Color y absorción de aceite

- El alto brillo y la blancura reduce la carga de pigmento.
- Una absorción de aceite muy baja reduce el volumen del embase, lo que contribuye a reducir los costes del pigmento.

- Características químicas

- Una wollastonita en solución al 10 % tiene un pH de 9.9. Aunque esto la hace inadecuada para cierto tipo de pinturas sin embargo es ventajoso para pinturas de acetato de polivinilo (PVA), donde ello ayuda a neutralizar el cambio de acidez. El PVA puede descomponerse en alcohol de vinilo y ácido acético, pero la presencia de la wollastonita mantiene la naturaleza básica de la pintura y así combate la corrosión.

Las variedades molidas de wollastonita son utilizadas en pinturas, donde aporta refuerzo a las películas de pintura, facilidad para el lavado, buena retención del color, baja absorción de aceite y baja demanda en agua. En revestimientos con textura, estucados y rellenos en bloque y en revestimientos para techos, se utilizan variedades de alto ratio, aumentando la resistencia mecánica, la durabilidad, la resistencia a la acción atmosférica y al agrietamiento, así como a todos aquellos defectos provenientes del paso del tiempo, aumenta el brillo y disminuye la tendencia al combado.

Para revestimientos pulverulentos, tales como los decorativos, funcionales y de tuberías, se utiliza wollastonita de tamaño fino de partícula. Ellos aportan distribución controlada del tamaño de partícula, resistencia a la cohesión y al agua caliente, retención del color y flujo controlado de la fundición. En recubrimientos industriales, dependiendo de la calidad del producto acabado, la wollastonita de tamaño fino y la modificada químicamente (**Wollastocoat**) aportan un amplio campo de tratamiento para el PVC (cloruro de polivinilo), buenos rendimientos con todos los tipos de vehículos, facilidad de dispersión, baja absorción de aceite, resistencia a los desconchones y a la corrosión. Por ello la wollastonita puede actuar como un "extensor inhibidor de la corrosión", en parte reemplazando a pigmentos inhibidores más caros, como por ejemplo los basados en fosfato de zinc.

Una propiedad igualmente importante de la wollastonita es su estable pH de 9.9. Las nuevas pinturas de látex que se han hecho predominantes en la industria de los recubrimientos, han contado con la wollastonita como un efectivo retardante alcalino para impedir la desestabilización del pH, especialmente cuando se usan pigmentos ácidos y extensores tales como el caolín y el silicato aluminico termo-óptico.

De hecho, en un estudio de 1979, se comparaban las cargas de wollastonita con las de CO₃Ca, silicato magnésico y sienita nefelínica, siendo la wollastonita la única carga que mantenía un pH alcalino tras un largo tiempo de almacenaje de la pintura, garantizando así la estabilidad de la pintura durante largo tiempo y el mantenimiento de la viscosidad, a la vez que permitía la eliminación de los conservantes, tales como el amonio y otras aminas, de las composiciones de ciertas pinturas de látex.

En China la wollastonita de alto grado se utiliza en pinturas de látex con base de benceno, reemplazando un 10 % de TiO₂. Con una promoción continuada y comercialización ésta variedad será ampliamente utilizada en pinturas de interior, exterior y de tráfico.

En conjunto, los mercados mundiales para recubrimientos han mejorado, debido a un incremento basado en la construcción y el desarrollo, una recuperación en el sector del automóvil y mejoras en otras industrias consumidoras de pinturas; siendo, la industria mundial de los revestimientos, el mercado con mayor crecimiento para la wollastonita (Loughbrough, 1993; de Decker, 1997; Houssa, 1998).

La wollastonita, como simple carga para pinturas, tiene que competir con una variedad de materiales más económicos como se refleja en la Tabla 29.

	<i>Forma de la partícula</i>	<i>Tamaño</i> ¹ (μ m)	<i>Brillo</i> (%)	<i>Absorción de aceite</i> (%)	<i>Peso específico</i>	<i>Índice de refracción</i>
Asbestos (crisotilo)	fibrosa	-	85	40-90	2.5	1.50
Attapulgita	acicular	0.1 ²	-	80-190 ³	2.4	-
Barita	irregular	1-12	-	5-13	4.44	1.64
Caolín	laminar	0.2-5	80-93	25-58	2.6	1.56
Carbonato cálcico	romboidal	5-44	93-95	6-15	2.7	1.60
Diatomita	amorfa	4-8	-	130-170	2.2	1.45
Mica (moscovita)	laminar	44-120	-	48	2.7	1.59
Sílice	irregular	1-5	85-91	22-32	2.6	1.55
Talco	variada ⁴	2.5-13	65-90	29-72	2.85	1.59
Wollastonita	acicular	3-8	84-93	26	2.9	-

¹- Equivalente al diámetro esférico

²- Variedad coloidal; las variedades agrícolas son del 95 % menores de las 100-200 mallas

³- Variedad agrícola

⁴- Puede ser lamelar, fibrosa o foliar

A no ser que los suministros de la wollastonita sean baratos y realmente asequibles, su utilización estará relativamente limitada; aunque las variedades pulverulentas y aciculares juegan un papel importante en las pinturas especiales, sobre todo en el campo de los revestimientos industriales anticorrosivos y en las pinturas con textura.

12.6.- OTROS MERCADOS

12.6.1.- VIDRIO

En la industria del vidrio y de la fibra de vidrio se utilizan pequeñas cantidades de wollastonita, generalmente como aditivo para reemplazar a las calizas y la sílice y reducir el consumo de energía. También se añade para reducir escorias (restos de material no fundido que flotan en la superficie del vidrio fundido) e inclusiones (microburbujas embebidas en el vidrio).

12.6.2.- MEDICINA

Una nueva aplicación son los implantes de huesos sintéticos, en los que una forma sintética de la wollastonita- β (la forma cristalina de la wollastonita natural) es utilizada para corregir daños óseos y como una efectiva prótesis vertebral en casos donde se necesita una fuerte capacidad de sustentación (Karlov et al., 1997; de Aza et al., 2000a y 2000b; Ido et al., 2000; Mousa et al., 2000; Siriphannon et al., 2000; Tworzydło et al., 2000).

El principal productor de este material es *Nippon Electric Glass Co.*, en Otsu Shiga (Japón), quien comercializa varios tipos diferentes del hueso artificial bajo el nombre de **Cerrabone**.

Se cree, sin embargo, que el volumen de wollastonita producido y utilizado para esta aplicación es ínfimo respecto a los mercados mundiales de wollastonita.

12.6.3.- ELECTROCERÁMICOS

La wollastonita es un mineral no conductor, por esta razón la wollastonita de alta pureza es utilizada en electrocerámicos de alta resistencia.

12.6.4.- FERTILIZANTES

La wollastonita actúa como el material base para enriquecer el fertilizante con los componentes multielementales. Después del tratamiento, el fertilizante es aplicado para acidificar el suelo y poder aumentar la producción entre un 7-17 %. Tras muchos años de investigación y experimentación, el fertilizante es ahora utilizado en China en los cultivos de remolacha y tabaco, donde se han obtenido buenos resultados.

En la Tabla 30 se presentan las principales propiedades de la wollastonita y sus usos más extendidos en los diferentes sectores industriales.

Tabla 30. Propiedades de la wollastonita y sus usos

Sector / Propiedad	USO / RESULTADO
CERAMICA Acción como fundente Limitada pérdida por calcinación sin contenido de carbonatos Acicularidad Baja expansión térmica coeficiente / resistencia al choque térmico 46-92 % de contenido en CaO 48-52 % de contenido en SiO ₂	reduce la temperatura de sinterización y el tiempo de calentamiento / enfriamiento minimización de la evolución gaseosa, favoreciendo la formación de superficies lisas aporta alta resistencia, actúa como canales que ayudan rápidamente el paso la humedad, proporciona buenas cualidades acústicas a las superficies de los azulejos aumenta la estabilidad dimensional mejora la solidez del vidriado y la superficie final de los vidrios alcalinos reemplaza algunos feldespatos, silice y caolín
PLÁSTICOS Acicularidad Estabilidad dimensional Baja absorción de agua Baja absorción plástica Baja viscosidad en cargas altas Alto brillo / blancura Propiedades dieléctricas Dureza	refuerza el plástico y confiere pulido final reduce la contracción aumenta la resistencia a las manchas aumenta el peso de las cargas reduce el peso del pigmento aumenta el aislamiento eléctrico aumenta la resistencia al deterioro
METALURGIA Baja temperatura de fusión	mejora la superficie final en el acero colado e inhibe la chispa en soldadura
PINTURAS Cristales aciculares Baja absorción de aceite pH 10 (en solución al 10 %) Químicamente inerte Alto brillo / blancura	actúa como agente alisador, aportando tenacidad y durabilidad al revestimiento reduce el volumen de ligazón requerido ayuda en la neutralización de los cambios ácidos y previene la corrosión aporta estabilidad química reduce la necesidad de carga del pigmento

Fuente: Fattah (1994)

13.- CALIDADES Y ESPECIFICACIONES

Las especificaciones de la wollastonita vienen influidas por la variedad de mineral del que se trate: de bajo ratio o de alto ratio.

Las variedades de tamaño fino de partícula están regladas por el tamaño de partícula máxima y por la media. Así, por ejemplo, la denominación de wollastonita de 45 μm significa que el 99 % de la muestra presenta un tamaño de partícula $< 45 \mu\text{m}$.

En función del uso final pueden añadirse otra serie de especificaciones para las variedades molidas y de tamaño fino de partícula, tal es el caso de la relación color/blancura, absorción de aceite, PPC, distribución del tamaño de partícula y densidad del material en bruto (natural y manipulada), etc.

Las variedades de alto ratio están limitadas por la densidad del material en bruto (natural y manipulado).

Las especificaciones para la wollastonita modificada químicamente incluyen: porcentaje de modificador químico utilizado, humedad y, dependiendo de la variedad de que se trate, una o más de las propiedades anteriormente mencionadas.

Tabla 31. Propiedades físicas de la wollastonita natural comercial

PAÍS	ESTADOS UNIDOS			FINLANDIA	INDIA		
<i>Empresa</i>	<i>NYCO</i>			<i>R.T. Vanderbilt</i>	<i>Partek</i>	<i>Wolkem</i>	
PRODUCTO	NYAD G	NYAD FP	NYAD 400	VANSIL	WICROLL	FW	Kemolit
Brillo G. E. (%)	85	70	94	87			
Brillo ISO (%)					88-90	84-86	96-98
Densidad en bruto							
producto natural	25	85	40				24-35
prod. manipulado	50	90	60				29-51
Ratio	15:1	5:1			6:1-8:1	3:1	8:1-20:1
Tamaño de partícula	-200	-10	-400	-200 / -325			

Para su uso en cerámica la wollastonita natural necesita elevada blancura, alta pureza química (bajo contenido en Fe, Ti, Mn y PPC) y fracción fina -200 / -325 mallas.

En el caso de la wollastonita sintética se necesita un bajo contenido en Fe_2O_3 ($\leq 0.12-0.3 \%$). En el caso de la wollastonita sintética, para uso metalúrgico, necesita bajo S ($\leq 0.009 \%$) y P ($\leq 0.008 \%$).

En aplicaciones como cargas, la acicularidad (15:1 a 20:1), junto con el tamaño de grano (-200 a -1250 mallas) y el brillo ($> 90 \%$) son imprescindibles.

La composición química tipo de una wollastonita comercial y sus propiedades físicas quedan recogidas en la Tabla 32.

Tabla 32. Composición química de la wollastonita natural comercial (%)									
	ESTADOS UNIDOS		FINLANDIA		RUSIA	Turquía	INDIA	CHINA	
	NYCO	R.T. Vanderbilt	Partek					Wolkem	Jilin
			(carga)	(cerámica)					
CaO	47.50	44.04	47.70	43.50	40.64	47.50	47.04	43.00	46.10
SiO ₂	51.00	50.50	52.50	53.00	37.93	47.95	49.52	50.00	50.59
Fe ₂ O ₃	0.40	0.26	< 0.20	< 0.25	1.56	0.58	0.43	0.08	0.38
MgO	0.10	1.48	< 0.50	< 0.80	1.70	0.78	0.20	0.04	1.03
Al ₂ O ₃	0.10	1.75	< 0.80	< 1.00	3.66	2.37	0.60	0.05	0.33
PPC	-	2.18	< 1.20	6.16	13.82	0.52	1.68	2.00	1.30
Al ₂ O ₃	0.1	1.75	< 0.8	< 1.00	3.66	2.37	0.60	0.05	0.33
PPC	-	2.18	< 1.2	6.16	13.82	0.52	1.68	2.00	1.30

14.- SUSTITUTOS Y ALTERNATIVAS

Dadas sus características intrínsecas, la wollastonita puede sustituir a una serie muy amplia de minerales y otras sustancias en los diferentes campos de aplicación, tal como queda recogido en la tabla siguiente.

APLICACIONES	MINERALES Y SUSTANCIAS
Cerámica	caolín, carbonato cálcico, dolomita, feldespato, sílice, talco
Cargas	barita, caolín, carbonato cálcico, feldespato, mica, perlita, piedra pómez, pirofilita, sienita nefelínica, sílice microcristalina, sílice mineral molida, sílice sintética, talco, trihidrato de aluminio (ATH)
Materiales de fricción	alúmina, asbesto, attapulgita, barita, bauxita, caolín, grafito, granate, mica, piedra pómez, pirofilita, sepiolita, sílice, pizarras, vermiculita, yeso, zircón
Aislamientos	asbesto, diatomita, espuma de vidrio, metales o cemento, perlita, piedra pómez, vermiculita, zeolitas

No obstante, y a pesar de que las características de la wollastonita puedan ser mejores que las de las sustancias referidas, el precio va a ser el primer factor a sopesar a la hora de llevar a cabo la sustitución.

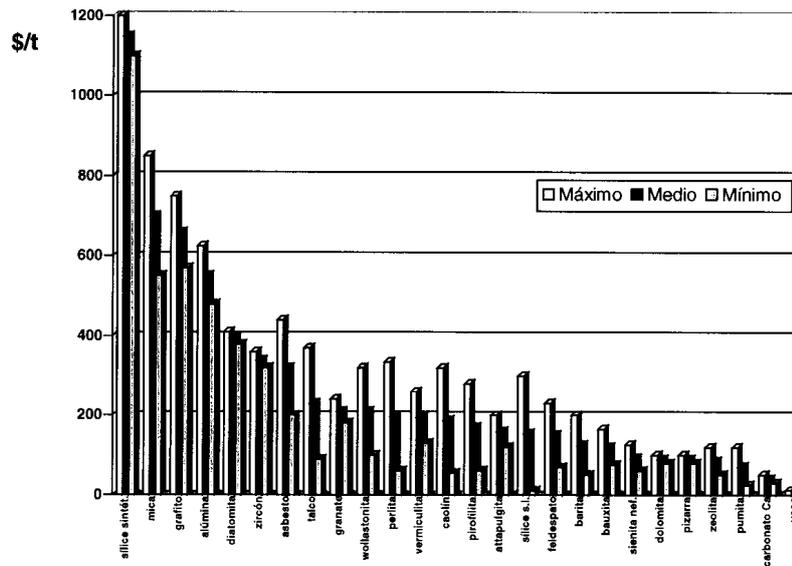


Fig. 74.- Distribución de precios, de las sustancias que compiten con la wollastonita en las diversas aplicaciones comerciales.

A la vista del histograma se deduce que la wollastonita ya es más competitiva que algunos minerales: mica, grafito, diatomita, asbesto, talco, etc., pero aún está muy lejos de alcanzar las cotas de otros duros competidores en los mercados, sobre todo en el cerámico (calcita, dolomita, feldespatos).

V.-FACTORES ECONÓMICOS

15.- DEMANDA Y SUMINISTRO

La demanda mundial estimada es de unas 700.000 t y los productos comerciales pueden clasificarse en las cuatro categorías siguientes:

- 1.- variedades molidas: polvo molido a 45-75 μm
- 2.- variedades con tamaño de partícula fina: productos molidos y clasificados mediante aire, con un tamaño máximo de 10 a 15 μm
- 3.- variedades de alto ratio: productos especialmente molidos a un ratio de 15:1 a 20:1
- 4.- variedades tratadas químicamente: productos provenientes de cualquiera de las tres categorías anteriores, cuya superficie ha sido modificada mediante diversos productos químicos para mejorar sus rendimientos en sistemas basados en resinas

En 1991 los productos de alto ratio supusieron más del 35 % de la wollastonita consumida y las variedades modificadas químicamente un 10 % aproximadamente. La demanda de cualquiera de estos dos grupos de productos continuó su crecimiento alcanzando las variedades de alto ratio, en 1993, valores superiores al 50 % del consumo mundial y los productos modificados químicamente un 15 % del total.

EE.UU. es el mayor productor mundial de wollastonita con un 41-43 % del suministro mundial, contando la planta de Hermosillo (Méjico). EE.UU. y la India son los mayores suministradores de variedades de alto ratio, controlando ambos más del 90 % de las ventas. EE.UU., con más del 80 % de las ventas y Finlandia, con un 15 % de las mismas, son los principales productores de wollastonita tratada químicamente.

Los materiales de construcción y los productos basados en polímeros, como plásticos, embalajes y adhesivos, consumen más del 60 % de la producción mundial de wollastonita. Otros mercados son los revestimientos, refractarios, fundentes metálicos, enriquecedores del suelo y otros usos. EE.UU. consume más del 35 % de la producción mundial, Europa más del 25 % y Asia un 30 %.

16.- PRECIOS

Como cualquier otro producto mineral el precio de la wollastonita depende de la calidad y cantidad existente en el mercado. El material con alto ratio presenta precios manifiestamente superiores a los que tienen las variedades molidas y pellets.

Por lo general, los precios de la wollastonita permanecieron bastante estabilizados durante 1997, a pesar de la fuerte demanda. Esto se debió, principalmente, a que las direcciones de producción de las distintas compañías adecuaron su ritmo al de la demanda, incrementando para ello su capacidad.

Debido al inicio de la explotación de wollastonita de NYCO en Hermosillo (Méjico), a principios de 1998, los precios presentaron un cierto descenso, aunque es posible que la demanda en alguno de los sectores se incremente entre un 10-20 % anual.

La evolución de los precios en EE.UU. durante los últimos años queda reflejada en la tabla adjunta:

Tabla 34. Evolución de los precios de la wollastonita acicular en los EE.UU.

	- 400 mallas (\$/t)	- 325 mallas (\$/t)	- 200 mallas (\$/t)
1988	160	155	215
1989	195	185	240
1990	195	185	265
1991	195	185	265
1992	235	210	170
1993	245	245	175
1994	270	270	190
1995	275	250	195
1996	275	250	196
1997	275	250	197
1998	250	225	180
1999	260	235	190
2000	260	235	190

Fuente: Industrial Minerals y Harben (19999)

Mientras el precio de la wollastonita de calidad para plásticos ha permanecido estable durante algún tiempo (alrededor de 440 \$/t en el Reino Unido y 250 \$/t en los EE.UU.), el material con unas especificaciones exactas en cuanto a tamaño de partícula o altos valores de ratio puede alcanzar precios de unos 600-650 \$/t.

Aquellos productos que tienen tratamiento superficial pueden doblar, perfectamente, estos precios.

17.- SALUD Y SEGURIDAD

Debido a que la wollastonita es un mineral compuesto de sílice y con estructura hojosa o acicular, se han planteado algunas dudas referente a sus efectos sobre la salud. Estos problemas vienen derivados de la controversia surgida respecto a los asbestos y otros minerales fibrosos en general y las consecuencias que para la salud supone la inhalación del polvo que desprenden (Bolton et al., 1986; Merchant, 1990; Aslam et al., 1995; Yamada et al., 1997; Marchand et al., 2000).

Para determinar si la wollastonita constituye un peligro para la salud se han desarrollado tres tipos distintos, pero complementarios, de estudios sobre los productos obtenidos del mineral:

- ☆ pruebas “in vitro” utilizando células, tejidos y órganos humanos o de animales, para evaluar la actividad biológica y patológica potencial.
- ☆ estudios en vivo (animales) para examinar mecanismos de cualquier tipo de afección.
- ☆ investigaciones epidemiológicas que estudian, sobre poblaciones específicas, la distribución de las enfermedades y sus agentes determinantes.

Cada uno de estos tipos de estudios produce información que, a menudo, complementa y se correlaciona con la generada por los otros tipos. En ninguno de esos estudios se han encontrado evidencias que sugieran que la wollastonita representa un riesgo para la salud.

Debido a que los efectos sobre la salud, al inhalar polvo de wollastonita, a largo plazo parecen ser insignificantes, el mineral ha sido situado en el Grupo 3, “no clasificable como cancerígeno para los humanos”, de la clasificación de la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC), dependiente de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

No obstante algunos autores, basándose en la relación que parece existir entre algunas enfermedades respiratorias graves con los minerales fibrosos (Lemaire et al., 1989; Jarvholm et al., 1995; Holian et al., 1997; Hurbankova & Kaiglova, 1997; Hansen et al., 1999), consideran que, sin ser potencialmente cancerígeno, la wollastonita puede originar “ciertos efectos fibrogénicos” (Huuskonen et al., 1983a y 1983b; Cambelova & Juck, 1994; McConnell, 1995; Lemaire & Ouellet, 1996; Koskinen et al., 1997).

El Instituto Fraunhofer para Toxicología de Hannover (Alemania), está llevando a cabo una investigación acerca de la durabilidad de la wollastonita en los pulmones. Este estudio pretende demostrar que la wollastonita es una fibra que no permanece en los pulmones, si esto es así se la excluirá en el futuro de la legislación sobre fibras (Bellmann & Muhle, 1994; Bellmann et al., 1994; Muhle et al., 1994).

La IARC clasifica la sílice cristalina como Clase 1, “carcinógeno conocido”. Así, los minerales industriales y productos químicos que contengan ≥ 0.1 % de sílice cristalina están regulados en EE.UU. por la OSHA¹⁴, para que exista el derecho del trabajador a conocer la regulación relativa en cuanto a formación, etiquetado del producto y a la existencia de una Hoja de Datos de Seguridad (MSDS) describiendo el riesgo cancerígeno. Por tanto, a menos que se reduzca el contenido en sílice cristalina a cantidades <0.1 %, la wollastonita estará sometida a las regulaciones del OSHA’s Hazard Communication Standards.

En Europa su uso está prohibido en Suiza y Suecia, donde el contenido permisible de wollastonita en el aire es menor que el de sílice.

¹⁴. - Occupational Safety & Health Administration (OSHA)

Los productores han constituido el Centro de Información de la Wollastonita (WIC) para coordinar la distribución de la información científica sobre los aspectos sanitarios y de seguridad de la wollastonita, y así *NYCO Minerals Inc.* ha preparado ya un completo Manual sobre Salud y Seguridad.

18.- AGRADECIMIENTOS

La realización del presente Inventario no habría sido posible de no haber contado con la colaboración entusiasta y desinteresada de una serie de instituciones, tanto públicas como privadas, y de las personas concretas que las encarnaban. Por ello, y porque es de justicia, queremos desde aquí públicamente reconocer esa ayuda tan valiosa que nos han proporcionado.

~ **ALMAGRERA, S.A.**

• **Dptº. de Geología**

D. Américo Santos Bonaño (Jefe de Departamento)

~ **CARIJA, S.A. Construcción**

~ **COMPAÑÍA MINERA ILUSTRACIÓN, S.A.**

D. Tomás Vecillas Fernández (Director Facultativo)

~ **JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN (Consejería de Industria, Comercio y Turismo)**

• **Dirección Gral. de Industria, Energía y Minas**

• **Servicio de Minas**

D. Francisco Orviz Castro (Jefe del Servicio)

D. Elías García Fernández (Jefe del Área de Ordenación y Planificación)

• **Serv. Territ. de Industria, Comercio y Turismo (Sección de Minas) de Salamanca**

~ **JUNTA DE EXTREMADURA (Consejería de Economía, Industria y Comercio)**

• **Dirección Gral. de Ordenación Industrial, Energía y Minas**

Ilmo. Sr. D. Alfonso Perianes Valle (Director General)

D. Pedro García Isidro (Jefe del Servicio de Ordenación Industrial, Energía y Minas de Cáceres)

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, R.G. (1989).- A Stratigraphic, Plutonic and Structural Framework for the Iskut River Area, Northwestern British Columbia. *Current Research, Part. E. Geol. Survey of Canada*, paper 89-1E, 145-154.
- Andrews, P.R.A. (1993).- Wollastonite. *CANMET Summary Rpt.*, 18, 31 pp.
- Andrews, R. W. (1970).- Wollastonite. *Inst. Geol. Sc., Her Majesty's Stationery Office*, 114 pp. London.
- Anónimo (1992).- Wollastonite interest continues. *Industrial Minerals*, November, 302, 19-19. London.
- Anónimo (1994a).- NYCO buys wollastonite deposit. *Industrial Minerals*, March, 318, 16-16. London.
- Anónimo (1994b).- Colmenar Viejo wollastonite faces project. *Industrial Minerals*, March, 318, 17-17. London.
- Anónimo (1995).- Gwalia's wollastonite joint venture. *Industrial Minerals*, June, 333, 15-15. London.
- Anónimo (1999).- Lishu opens new wollastonite mine. *Industrial Minerals*, January, 376, 13-13. London.
- Aslam, M.; Arif, M.J. & Rahman, O. (1995).- Red blood cell damage by wollastonite: in vitro study. *J. Appl. Toxicol.*, January-February, 15 (1), 27-31.
- Baker, J.H.; Hellingwerf, R.H. & Oen, I.E. (1988).- Structure, stratigraphy and ore-forming processes in Bergslagen: implications for the development of the Svecofennian of the Baltic Shield. *Geologie en Mijnbouw*, 67, 121-138.
- Bastida, J.; Lago San José, M. y Pocoví, A. (1987).- Mineralizaciones asociadas a diabasas del área de Lugar Nuevo de Fenollet (Valencia). *Bol. Soc. Esp. Mineralogía*, 10-1, 62-62. Madrid.
- Bauer, R.R.; Copeland, J.R. & Santini, K. (1994).- Wollastonite. In: "Industrial Minerals and Rocks". Carr, D.D., ed. *SME*, 6th ed., 1119-1128. Littleton, Colorado.
- Bellmann, B. & Muhle, H. (1994).- Investigation of the biodurability of wollastonite and xonotlite. *Environ. Health Perspect.*, October, 102 (5), 191-195.
- Bellmann, B.; Muhle, H.; Kamstrup, O. & Draeger, U.F. (1994).- Investigation on the durability of man-made vitreous fibers in rat lungs. *Environ. Health Perspect.*, October, 102 (5), 185-189.
- Berry, L.G. y Mason, B. (1966).- Mineralogía. *Ed. Aguilar*, 690 pp. Valencia.
- Bolger, R. (1998).- Wollastonite. Quality remains the key aspect. *Industrial Minerals*, November, 374, 41-51. London.
- Bolton, R.E.; Addison, J.; Davis, J.M.; Donaldson, K.; Jones, A.D.; Miller, B.G. & Wright, A. (1986).- Effects of the inhalation of dusts from calcium silicate insulation materials in laboratory rats. *Environ. Res.*, 39 (1), 26-43.
- Bowen, N.L.; Schairer, J.F. & Ponsjak, E. (1933).- The system CaO-FeO-SiO₂. *Am. J. Sc.*, 26, 193-283.

Buerger, M.J. & Prewitt, C.T. (1961).- The crystal structure of wollastonite and pectolite. *Proceed. Nat. Acad. Sc. USA*, 254, 239-256.

Cabrera Ceñal, R.; Crespo Ramón, J.L.; García de los Ríos Cobo, J.I.; Mediavilla Manzanal, B.; Armenteros Armenteros, I.; Gómez Medina, D.; Escudero Tejedor, J.; Tejedor Aibar, J.; Rico Castroño, R.; Hoyuela Jayo, A.; López Plaza, M.; Peinado Moreno, M.; García Palacios, C.; Sánchez García, I.; Fraile Ramos, C.; Timón Sánchez, S.; Barba Regidor, P.; Colmenero Navarro, J.R.; Díez Balda, M.A.; Rodríguez Alonso, M.D.; Valladares González, I.; Gutiérrez-Alonso, G.; Moro Benito, C.; Porres Benito, J.A.; González López, J.C.; Trapote Redondo, M.M.; Sánchez García, I.; Martínez Noguera, L.; Pelaz Bragado, Y. y Jiménez Benayas, S. (1997).- Mapa Geológico y Minero de Castilla y León. Escala 1:400.000. *SIEMCALSA*, 459 pp., 3 map. y 1 CD-ROM. Valladolid.

Calderón, S. (1910).- Los minerales de España. *Junta Ampl. Est. Invest. Cientif.*, Tomo II, 443-444. Madrid.

Cambelova, M. & Juck, A. (1994).- Fibrogenic effect of wollastonite compared with asbestos dust and dusts containing quartz. *Occup. Environ. Med.*, May, 51 (5), 343-346.

Carandell, J. (1914).- Las calizas cristalinas del Guadarrama. *Trab. del Museo Nac. Ciencias Nat., Ser. Geol.*, 8, 69 pp. Madrid.

Casanova, J.M. y Ochando, L.E. (1998).- Los minerales del afloramiento volcánico de Lugar Nuevo de Fenollet (Valencia). *Revista de Minerales*, 1 (7), 242-249.

Clark, D.W. (1980).- Hunter Mountain Wollastonite, Northern Death Valley Area, California. In: "Geology and Mineral Wealth of the California Desert". Fife, D.L. & Brown, A.R., eds. *South Coast Geol. Soc.*, 294-298. Santa Ana, California.

Coulson, I.M.; Russell, J.K. & Dipple, G.M. (1999).- Origins of the Zippa Mountain pluton: a Late Triassic, arc-derived, ultrapotassic magma from the Canadian Cordillera. *Canadian J. of Earth Sc.*, 36/9, September 1999, 1415-1434.

Crouse, D. & Akerley, P. (1994).- Geology of the St. Lawrence wollastonite deposit, Seeley's Bay, Ontario. *SME Preprint 94-238*, 7 pp.

Dana, J.D. y Hurlbut, C.S. (1960).- Manual de Mineralogía. *Ed. Reverté, S.A.*, 598 pp. Barcelona.

de Aza, P.N.; Luklinska, Z.B.; Anseau, M.R.; Hector, M.; Guitián, F. & de Aza, S. (2000a).- Reactivity of a wollastonite-tricalcium phosphate Bioeutectic ceramic in human parotid saliva. *Biomaterials*, September, 21(17), 1735-1741.

de Aza, P.N.; Luklinska, Z.B.; Martínez, A.; Anseau, M.R.; Guitián, F. & de Aza, S. (2000b).- Morphological and structural study of pseudowollastonite implants in bone. *J. Microsc.*, January, 197 (1), 60-67.

de Decker, M. (1997).- Fillers & extenders. European market trends. *Industrial Minerals*, December, 363, 29-35. London.

de Decker, M. (1999).- White minerals in plastics. Market developments. *Industrial Minerals*, September, 384, 58-65. London.

de Rudder, R.D. (1962).- Mineralogy, Petrology and Genesis of the Willsboro Wollastonite Deposit, Willsboro Quadrangle, New York. *Ph. D. Thesis, Indiana Univ.*, 136 pp. Bloomington, Indiana.

DGM-ENADIMSA (1988).- Proyecto: Suroeste. Actuación: Wollastonita de Aroche. *SISTEMINER. Direcc. Gral. Minas (informe inédito)*, 100 pp. Madrid.

DGM-ENADIMSA (1989).- Prospección de wollastonita en los P. I. de Aroche (Huelva). *SISTEMINER. Direcc. Gral. Minas (informe inédito)*. Madrid.

Domínguez, A.; Fernández, D.; Schubnel, H.J.; Tello, B.; Torcal, R.; Torcal Jr., R. y Velasco, C. (1968).- Enciclopedia SALVAT de las Ciencias. *Salvat S.A.*, 7, 347 pp. Barcelona.

Dowson, W.J. (1988).- Hydrothermal Synthesis of Advanced Ceramic Powder. *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 67 (10), 1673-1678.

Elevatorski, E.A. (1983).- Wollastonite. In: "Industrial Minerals and Rocks". Lefond, S.J., ed. 5th ed. *AIME*, 1383-1390. New York.

ENADIMSA (1984).- Proyecto de investigación de mármoles en Aroche (Huelva). *Direcc. Gral. Minas (informe inédito 50.146)*, 2 tomos. Madrid.

ENADIMSA (1990).- Prospección de wollastonita. Proyecto Suroeste del SISTEMINER. *Direcc. Gral. Minas (informe inédito)*, 65 pp. Madrid.

Essene, E.J. (1974).- High-pressure transformations in CaSiO₃. *Contrib. Min. Petrol.*, 45, 247-250.

Fattah, H. (1994).- Wollastonite. New aspects promise growth. *Industrial Minerals*, November, 326, 21-43. London.

Fernández, C.J. y Blanco, M. (1992).- El skarn de Cu-As-Au de Carlés (Asturias). *III Congr. Geol. España y VIII Congr. Latinoamericano Geol. Act.* 3, 363-367. Salamanca.

Fernández Caliani, J. C. (1991).- Estudio geológico y posibilidades de utilización de la wollastonita de Mérida (Badajoz). *Junta de Extremadura (informe inédito)*. Mérida.

Fernández Caliani, J. C. (1995).- Geología, mineralogía y génesis de las mineralizaciones de wollastonita de Mérida (Extremadura). *Tesis Doctoral. Univ. Sevilla*, 347 pp. Sevilla.

Fernández Caliani, J.C.; Casquet, C. & Galán, E. (1994).- Complex multiphase fluid inclusions in wollastonite from the Mérida (Spain) contact metamorphic deposit. Evidence for fluid mixing. *16th General Meeting of the Intern. Mineral. Assoc.*, Book of Abs., 116-116. Pisa.

Fernández Caliani, J.C.; Casquet, C. & Galán, E. (1996a).- Complex multiphase fluid inclusions in wollastonite from the Mérida (Spain) contact metamorphic deposit. Evidence for rock/HCl-rich fluid interaction. *European J. of Mineralogy*, 8, 1015-1026.

Fernández Caliani, J.C.; Galán Huertos, E. y Hernández Arnedo, M.J. (1996b).- Mineralogía y consideraciones sobre el origen de la wollastonita de Mérida (Badajoz). *Bol. Soc. Esp. Mineralogía*, 19, 147-160. Madrid.

-
-
-
- Fischl, P. (1991).- Wollastonite and Tremolite Occurrences in British Columbia. *Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources. British Columbia Geol. Survey Branch*, Open File 1991-17, 37 pp.
- Fountain, K. (1986).- Chinese wollastonite industry and commerce. *7th Industrial Minerals Int. Congr.*, Proceed., 117-125. Monte Carlo.
- Franco, M.P.; Carnicero, A.; Gonzalo, J.C. y Cano-Manuel, A. (1994).- *Asociaciones mineralógicas en los contactos mármoles-granitos en el área de Fermoselle (Domo del Tormes-Zamora)*. *Bol. Geol. Min.*, 105 (4), 389-396. Madrid.
- Gächler, R. & Müller, M. (eds.) (1983).- *Plastic Additives Handbook*. Hanser, Munich.
- Galán, E.; Liso, M.J.; Hernández, M.J. y Fernández-Caliani, J. C. (1993).- El contexto geológico de las mineralizaciones de wollastonita de Mérida (Extremadura). *Bol. Soc. Esp. Mineralogía*, 16-1, 51-52. Madrid.
- Galán Huertos, E. y Mirete Mayo, S. (1979).- *Introducción a los minerales de España*. *IGME*, 420 pp. Madrid.
- Goldschmidt, V.M. (1912).- Die Gesetze der Gesteinsmetamorphose mit Beispielen aus der Geologie des Südlichen Norwegens. *Vidensk. Skrift. I Math. Natur. Kl.*, 22, 238.
- Greenwood, H.J. (1967).- Wollastonite: stability in H₂O-CO₂ mixtures and occurrence in a contact-metamorphic aureole near Salmo, British Columbia, Canada. *Amer. Min.*, 52, 1669-1680.
- Gracia, A.; Meggiolaro, V.; Baker, J. & Bitzios, D. (1999).- Development of exploration and industrial technology to exploit new sources of wollastonite in Europe. *Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. B: Appl. earth. sc.)*, 108, 183-190. Eastbourne.
- Griffó Navarro, J.L. y Rincón Mayoral, A. (1990).- El yacimiento de wollastonita de Aroche (Huelva). *Canteras y Explotaciones*, Junio, 280, 95-108. Madrid.
- Hansen, E.F.; Rasmussen, F.V.; Hardt, F. & Kamstrup, O. (1999).- Lung function and respiratory health of long-term fiber-exposed stonewool factory workers. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, August, 160 (2), 466-472.
- Hanykyr, V.; Havrda, J. & Nakarova, A. (1983).- *Ceramic Powders*. Ed. by P. Vicenzini. Elsevier Scientific, Co. Amsterdam.
- Harben, P.W. (1999).- Wollastonite. In: "The Industrial Minerals HandyBook". *Industrial Minerals Information Ltd.*, 3rd ed., 229-232. London.
- Harben, P.W. & Kuzvart, M. (1996).- Wollastonite. In: "Industrial minerals. A Global Geology". *Industrial Minerals Information Ltd.*, 439-444. London.
- Harker, R.I. & Tuttle, O.F. (1956).- Experimental data on the P_{CO2}-T curve for the reaction: calcite + quartz = wollastonite + carbon dioxide. *Am. J. Sc.*, 254, 239-256.
- Hébert, C. & Jacob, H.L. (1995).- Wollastonite in Quebec Province, Canada. In: "Proceedings, 29th Forum on the Geology of Industrial Minerals". Tabilio, M. & Dupras, D.L., eds. *Calif. Dpt. Conservation, Div. Mines & Geol.*, Sp. Pub., 110, 245-251.
-
-

- Heller, L. & Taylor, H.F.W. (1956).- Crystallographic data for the calcium silicates. *H.M.S.O.* London.
- Holian, A.; Uthman, M.O.; Goltsova, T.; Brown, S.D. & Hamilton Jr, R.F. (1997).- Asbestos and silica-induced changes in human alveolar macrophage phenotype. *Environ. Health Perspect.*, September, 105 (5), 1139-1142.
- Houssa, C. (1998).- Minerals in paint & coatings. Focus on alternative technologies. *Industrial Minerals*, December, 375, 23-33. London.
- Hurbankova, M. & Kaiglova, A. (1997).- Some bronchoalveolar lavage parameters and leukocyte cytokine release in response to intratracheal instillation of short and long asbestos and wollastonite fibres in rats. *Physiol. Res.*, 46 (6), 459-466.
- Huuskonen, M.S.; Jarvisalo, J.; Koskinen, H.; Nickels, J.; Rasanen, J. & Asp, S. (1983a).- Preliminary results from a cohort of workers exposed to wollastonite in a Finish limestone quarry. *Scand. J. Work Environ. Health*, April, 9 (2) Spec N^o., 169-175.
- Huuskonen, M.S.; Tossavainen, A.; Koskinen, H.; Zitting, A.; Korhonen, O.; Nickels, J.; Korhonen, K. & Vaaranen, V. (1983b).- Wollastonite exposure and lung fibrosis. *Environ. Res.*, April, 30 (2), 291-304.
- Ibáñez, A. & Sandoval, F. (1993).- Wollastonite: Properties, Synthesis and Ceramic Application. *Bol. Soc. Esp. Ceram. y Vidr.*, 32 (6), 349-361. Madrid.
- Ibáñez, A. & Sandoval, F. (1998).- Producing Synthetic Wollastonite. *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 77 (9).
- Ido, K.; Asada, Y.; Sakamoto, T.; Hayashi, R. & Kuriyama, S. (2000).- Radiographic evaluation of bioactive glass-ceramic grafts in postero-lateral lumbar fusion. *Spinal Cord.*, May; 38 (5), 315-318.
- IGME (1979).- Estudio de los mármoles y calizas del Oeste (Salamanca, Cáceres y Badajoz). *Inst. Geol. Min. España (informe inédito n° 10.622)*. Madrid.
- ITGE (1989).- Panorama Minero 1987. *Inst. Tecnológ. Geom. España*, 438 pp. Madrid.
- ITGE (1990).- Panorama Minero 1988. *Inst. Tecnológ. Geom. España*, 428 pp. Madrid.
- ITGE (1991a).- Panorama Minero 1989. *Inst. Tecnológ. Geom. España*, 428 pp. Madrid.
- ITGE (1991b).- Mapa de Rocas y Minerales Industriales E/1:200.000. Hoja n° 74-75 (Puebla de Guzmán-Sevilla). *Inst. Tecnológ. Geom. España (informe inédito n° 11.282)*. Madrid.
- Ito, T. (1950).- X-ray studies on polymorphism. *Maruzen*. Tokyo.
- Jain, P.M. (1993).- Indian wollastonite. A success story. *Industrial Minerals*, December, 315, 39-41. London.
- Jarvholm, B.; Hillerdal, G.; Jarliden, A.K.; Hansson, A.; Lilja, B.G.; Tornling, G. & Westerholm, P. (1995).- Occurrence of pleural plaques in workers with exposure to mineral wool. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 67 (5), 343-346.
- Jaworski, B.J. (1996).- Geology and Controls on Skarn Formation at the Zippa Mountain Wollastonite Skarns, Northwestern British Columbia (104B/11). *Bach. Thesis, Univ. of British Columbia*.

- Jones, T. (1997).- Plastic fillers. A maturing market in Europe. *Industrial Minerals*, May, 356, 61-64. London.
- Junta de Extremadura (1994).- Informe sobre visita realizada al término municipal de Peraleda de San Román (Cáceres). *Junta de Extremadura (informe inédito)*, Marzo. Mérida.
- Karlov, A.V.; Vereschagin, V.I. & Pogrebenkov, V.M. (1997).- Bioactive ceramics substance for reconstruction of bone tissue. *Biomed. Tech. (Berl.)*, 42 Suppl., 409-410.
- Keeling, P.S. (1963).- The wollastonite deposit at Lappeenranta (Willmanstrand), S.E. Finland. *Trans. British Ceram. Soc.*, 62 (10), 877-894.
- Koskinen, H.O.; Nordman, H.L.; Zitting, A.J.; Suoranta, H.T.; Anttila, S.L.; Taikina-aho, O.S. & Luukkonen, R.A. (1997).- Fibrosis of the lung and pleura and long-term exposure to wollastonite. *Scand. J. Work Environ. Health*, February, 23 (1), 41-47.
- Kurczyk, H.G. (1976).- Synthetic Diopside and Synthetic Wollastonite - New Raw Materials for Ceramics. 3rd CIMTEC. Proceed. Rimini.
- Lago, M.; Dumitrescu, R.; Bastida, J.; Arranz, E.; Gil-Imaz, A.; Poci, A.; Lapuente, M.P. y Vaquer, R. (1996).- Características de los magmatismos alcalino y subalcalino, pre-Hettangiense, del borde SE de la Cordillera Ibérica. *Cuad. Geol Ibérica*, 20, 159-181. Madrid.
- Lefond, S.J. (ed.) (1983).- Industrial Minerals and Rocks. *AIMM-PE*, 1384-1387.
- Leguey Jiménez, S.; Casas Sainz de Aja, J.; Medina Núñez, J.A. y Hoyos Guerrero, M.A. (1976).- Estudio mineralógico de las calizas cristalinas del Puerto de Somosierra. *Bol. Geol. Min.*, 77 (5), 528-537. Madrid.
- Lemaire, I. & Ouellet, S. (1996).- Distinctive profile of alveolar macrophage-derived cytokine release induced by fibrogenic and nonfibrogenic mineral dusts. *J. Toxicol. Environ. Health*, 47 (5), 465-478.
- Lemaire, I.; Dionne, P.G.; Nadeau, D. & Dunnigan, J. (1989).- Rat lung reactivity to natural and man-made fibrous silicates following short-term exposure. *Environ. Res.*, April, 48 (2), 193-210.
- Liso, M.J. y Guixà, J. (1980).- Estudio geológico y mineralógico de la wollastonita de Mérida (Badajoz). *Bol. Soc. Esp. Mineralogía*, 2, 35-42. Madrid.
- Lombardero, M.; Regueiro, M.; Baltuille, J.M.; Rodríguez, M.A. & Criado, E. (1998).- Synthetic Minerals. Product & market review. *Industrial Minerals*, August, 371, 45-55. London.
- Loughbrough, R. (1993).- European paint. Coloured by environmental issues. *Industrial Minerals*, August, 311, 39-49. London.
- Lueck, B.A. & Rusell, J.K. (1994).- Geology and Origins of the Zippa Mountain Igneous Complex with Emphasis on the Zippa Mountain Pluton, Northwestern British Columbia. *Current Research, Geol. Survey of Canada*, paper 94-A, 77-85.
- Mamedov, K.S. & Belov, N.V. (1956).- The crystal structure of wollastonite. *Dokl. Akad. Sc. URSS*, 107, 463-466.

- Marchán Sanz, C.; Baeza Rodríguez-Caro, J.; Baltuille Martín, J.M.; Gómez Moreno, G.; González Lago, J.M^º; Lombardero Barceló, M.; Regueiro González-Barros, M.; Rubio Navas, J.; Sánchez Rodríguez, A.; Urbano Vicente, R.; Valero Diaz, N. y Zapatero Rodríguez, M.Á. (1998).- Panora Minero 1996. *Inst. Tecnol. Geom. España*, 384 pp. Madrid.
- Marchand, J.L.; Luce, D.; Leclerc, A.; Goldberg, P.; Orlowski, E.; Bugel, I. & Brugere, J. (2000).- Laryngeal and hypopharyngeal cancer and occupational exposure to asbestos and man-made vitreous fibers: results of a case-control study. *Am. J. Ind. Med.*, June, 37 (6), 581-589.
- Martel San Gil, M. (1975).- Afloramiento volcánico en el triásico de "Lugar Nuevo de Fenollet (Valencia)". *Trabajos científicos de Geología. 1^{er} Centenario de la R. Soc. Española Hist. Nat.*, 1, 287-300. Madrid.
- Martín Izard, A.; Palero Fernández, F.J.; Reguilón Bragado, R. y Vindel Catena, E. (1986).- El skarn de Carracedo (San Salvador de Cantamuda). Un ejemplo de mineralización pirometasomática en el N. de la provincia de Palencia. *Studia Geol. Salmant.*, 23, 171-192. Salamanca.
- Martínez García, E. (1981).- El paleozoico de la zona Cantábrica oriental (Noroeste de España). *Trab. de Geol. Univ. Oviedo*, 11, 95-127. Oviedo.
- Mason, J.E. (1966).- The Lolkidongai wollastonite occurrence, Kajiado District, Kenya. *Kenya Dpt. Mines and Geol. Inf. Circ.*, 3, 28 pp.
- McConnell, E.E. (1995).- Fibrogenic effect of wollastonite compared with asbestos dust and dusts containing quartz. *Occup. Environ. Med.*, September, 52 (9), 621-621.
- Merchant, J.A. (1990).- Human epidemiology: a review of fiber type and characteristics in the development of malignant and nonmalignant disease. *Environ Health Perspect.*, 88, 287-293.
- Mousa, W.F.; Kobayashi, M.; Shinzato, S.; Kamimura, M.; Neo, M.; Yoshihara, S. & Nakamura, T. (2000).- Biological and mechanical properties of PMMA-based bioactive bone cements. *Biomaterials*, November, 21(21), 2137-2146.
- Muhle, H.; Bellmann, B. & Pott, F. (1994).- Comparative investigations of the biodegradability of mineral fibers in the rat lung. *Environ. Health Perspect.*, October, 102 (5), 163-168.
- Navidad, M. y Villaseca, C. (1983).- Sobre la mineralogía del Skarn Férrico de Arroyo Zancado (Macizo de El Caloco-Guadarrama Central). *Rev. Mat. Proc. Geol.*, 1, 299-310. Madrid.
- O'Driscoll, M. (1993).- Minerals in European plastics. Polypropylene in the driving seat. *Industrial Minerals*, April, 307, 19-35. London.
- O'Hara, P. (1976).- The Economic Geology, Petrology and Origin of the Willsboro Wollastonite Deposit, New York. *MS Thesis, Queens College, City Univ. of New York*, 126 pp. New York.
- Ohashi, Y. & Finger, L.W. (1978).- The role of octahedral cations in pyroxenoids crystal chemistry. I: Bustamite, wollastonite and the pectolite-schzolute-serandite series. *Am. Min.*, 63, 274-288.
- Osborn, E.F. & Schairer, J.F. (1941).- The ternary system pseudowollastonite-ackermanite-gehlenite. *Am. J. Sc.*, 239, 715-763.

- Peacor, D.R. & Prewitt, C.T. (1963).- Comparison of the crystal structures of bustamite and wollastonite. *Am. Min.*, 48, 588-596.
- Power, T. (1986).- Wollastonite, performance filler potential. *Industrial Minerals*, January, 220, 19-34. London.
- Richet, P.; Robie, R.A. & Hemingway, B.S. (1991).- Thermodynamic properties of wollastonite, pseudowollastonite and CaSiO₃ glass and liquid. *Eur. J. Min.*, 56, 475-484.
- Rutstein, M.S. (1971).- Re-examination of the wollastonite-hedenbergite (CaSiO₃-CaFeSi₂O₆) equilibria. *Am. Min.*, 56, 2040-2052.
- Santana, V.; Bouchez, J.L.; Gleizes, G. y Tubía, J.M^a. (1992).- Estructura del plutón granítico de Panticosa (Pirineos). *III Congr. Geol. España y VIII Congr. Latinoamericano Geol. Simp. 2*, 179-185. Salamanca.
- Santini, K. (1989).- Preliminary Feasibility Study, Bosaginski Wollastonite Deposit, Kazakhstan U.S.S.R. (*unpublished report*), 80 pp.
- Simandl, G.J. (1990).- Gîtes de wollastonite, province tectonique de Grenville, Québec. *CIM Bull.*, Feb., 101-107.
- Siriphannon, P.; Kameshima, Y.; Yasumori, A.; Okada, K. & Hayashi, S. (2000).- Influence of preparation conditions on the microstructure and bioactivity of alpha-CaSiO₃ ceramics: formation of hydroxyapatite in simulated body fluid. *J. Biomed. Mater. Res.*, October, 52 (1), 30-39.
- Soler, A. y Delgado, J. (1991).- Los Skarns mineralizados en Sn-(Au) de l'Alt Urgell (Pirineos Centrales). *Bol. Soc. Esp. Mineralogía*, 14, 303-318. Madrid.
- Soler, A.; Ayora, C. y Delgado, J. (1991).- Los Skarns de wollastonita de La Cerdanya (Pirineo Central). *Bol. Soc. Esp. Mineralogía*, 14-1, 79-79. Madrid.
- Sos Baynat, V. (1962).- Mineralogía de Extremadura (Estudio sobre especies, yacimientos y génesis). *Bol. Inst. Geol. Min. España*, 73, 152-154. Madrid.
- Tanner, S.B.; Kerrick, D.M. & Lasaga, A.C. (1985).- Experimental kinetics study of the reaction: calcite + quartz = wollastonite + carbon dioxide, from 1 to 3 Kb and 500 to 850°C. *Amer. J. Sc.*, 285, 577-620.
- Tornos Arroyo, F. y Casquet Martín, C. (1984).- La mineralización de W-Sn-Cu-Zn-Pb de Otero de Herreros (Segovia). Un skarn con una zona de cizalla superpuesta. *I Congr. Esp. Geol.*, 2, 703-717. Segovia.
- Tornos Arroyo, F. y Casquet Martín, C. (1986).- Rasgos generales de los skarns y mineralizaciones asociadas del Sistema Central Español. *Cuaderno Lab. Xeológico de Laxe*, 10, 311-329. Laxe (O Castro-Sada).
- Trojer, F.J. (1968).- The crystal structure of parawollastonite. *Z. Krist.*, 127, 291-308.
- Troxel, B.W. (1957).- Wollastonite. Mineral Commodities of California. *California Division of Mines and Geology Bull.*, 176, 693-697.

Troxel, B.W. & Morton, P.K. (1962).- Mines and Mineral Deposits of Kern County, California. *County Rep.J., California Division of Mines and Geology Bull.*, 344-345.

Tworzydło, M.; Laczka, M.; Rajwa, B.; Dobrucki, J. & Turyna, B. (2000).- Evaluation of biocompatibility of apatite-wollastonite ceramics in fibroblast cultures. *Folia Histochem. Cytobiol.*, 38 (3), 133-141.

Van Merteen, T.G. (1988).- Lithostratigraphic correlations in an asymmetrical rift-basin: the Grythttan area, W. Bergslagen, Sweden. *Geologie en Mijnbouw*, 67, 203-212.

Velasco, F. y Amigó, J.M. (1979).- Los skarns con magnetita en el entorno del granito de Santa Ollala, Huelva. En: "I Reunión de mineralogía y metalogenia del hierro. Granada 1978". *Temas geol. min. Inst. Geol. Min. España*, 3, 89-116. Madrid.

Virta, R. L. (1992).- Asbestos substitutes. Matching performance. *Industrial Minerals*, December, 303, 47-51. London.

Warren, B.E. & Bischof, J. (1931).- The crystal structure of the monoclinic pyroxenes. *Z. Krist.*, 80, 391-401.

West, A.R. (1978).- Solid State Chemistry and Its Applications. *Wiley*, 41-42. Chichester- New York- Brisbane-Toronto-Singapore.

Winkler, H.G.E. (1965).- Petrogenesis of Metamorphic Rocks. *Springer-Verlag Ed.*, 28-30.

Yamada, H.; Hashimoto, H.; Akiyama, M.; Kawabata, Y. & Iwai, K. (1997).- Talc and amosite/crocidolite preferentially deposited in the lungs of nonoccupational female lung cancer cases in urban areas of Japan. *Environ. Health Perspect.*, May, 105 (5), 504-508.

Zhang, M.X. (1996).- Chinese wollastonite. Enjoying life in the fast lane. *Industrial Minerals*, June, 345, 59-63. London.