

DETERMINACION DE LOS FACTORES QUE CONTROLAN LA FORMACION DE SILICATOS DE MN EN LAS LITOLOGIAS MANGANESIFERAS DEL SECTOR CENTRAL DE OSSA-MORENA MEDIANTE LA APLICACION DE TECNICAS ESTADISTICAS MULTIVARIANTES

R. Jiménez Espinosa *, J. Jiménez Millán **, N. Velilla ** y M. Chica Olmo ***

RESUMEN

La utilización de técnicas estadísticas multivariantes, análisis de componentes principales (ACP) y análisis de correspondencias (AC), ha hecho posible identificar los factores determinantes de la cristalización de algunos minerales en las litologías ricas en Mn del área de Oliva de la Frontera (Macizo Ibérico, SW de España). El estudio petrológico y geoquímico de estas litologías nos hizo considerar tres tipos diferentes de variables: mineralógicas (presencia-ausencia de minerales), composicionales (elementos químicos mayoritarios) y físicas (fugacidad de oxígeno). El ACP fue aplicado a las variables composicionales con el objetivo de reconocer agrupaciones de elementos coherentes con las posibles fuentes geológicas de elementos del entorno. Las cuatro componentes obtenidas fueron utilizadas como las nuevas variables composicionales del sistema. El AC fue realizado considerando estas nuevas variables composicionales junto a las variables físicas y mineralógicas. Los tres primeros factores del AC explicaron una varianza próxima al 75 %. La proyección de las variables sobre el plano definido por los factores 1 y 2 revela que la cristalización de la tefroita está controlada por una variable composicional que representa bajos valores de la razón $Si/(Mn + Fe)$ en las rocas. Además, este diagrama pone de manifiesto la importancia de las condiciones de fugacidad de oxígeno sobre la cristalización de la piemontita. El tercer factor indica que la espesartina es el silicato de Mn que requiere condiciones menos restrictivas para su cristalización.

Palabras clave: Rocas manganíferas, análisis de componentes principales, análisis de correspondencias, cristalización metamórfica.

ABSTRACT

This paper aims to show how multivariate statistical procedures, principal component analysis (PCA) and correspondence analysis (CA), can be used to identify some critical mineral crystallization factors during metamorphism of Mn-rich lithologies. The data set was obtained from a petrographic and geochemical study of Mn-lithologies from Southern Iberian Massif, Spain. We considered three types of variables in the system: mineralogical variables, bulk chemistry variables and a physical variable (oxygen fugacity). PCA was applied to the compositional variables with the aim of recognizing groups of elements according to the geological evidence. We obtained four components, which were used as new variables that account for the variance of the compositional data in a more summarized manner. These new compositional variables, together with the mineralogical and physical variables, were treated in the CA. The plot of the variables on the factor 1-factor 2 plane reveals that tephroite crystallization is controlled by a compositional variable representing low values of ratio $Si/(Mn + Fe)$ in the rocks. Moreover, it is possible to deduce from this plot the importance of high oxygen fugacity conditions on the crystallization of piemontite. The third factor shows how the crystallization of spessartine does not require very restrictive physical-chemical conditions.

Key words: Mn-rocks, principal component analysis, correspondence analysis, metamorphic crystallization.

* Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias Experimentales. Universidad de Almería. Cañada de San Urbano. 04120 Almería.

** IAGM-Departamento de Mineralogía y Petrología. CSIC-Universidad de Granada. Facultad de Ciencias. Avenida Fuentenueva, s/n. 18071 Granada.

*** IAGM-Departamento Geodinámica. CSIC-Universidad de Granada. Facultad de Ciencias. Avda. Fuentenueva, s/n. 18071 Granada.

Introducción

Los sistemas metamórficos ricos en Mn suelen presentar numerosas y complejas asociaciones minerales. La aparición de determinados minerales en estas asociaciones está controlada por un conjunto de factores físico-químicos: presión, temperatura, fugacidad de oxígeno y composición global de los materiales premetamórficos. La influencia de dichos factores en la estabilidad de los minerales de manganeso ha sido tratada en numerosos estudios experimentales (Abs-Wurmbach *et al.*, 1983; Keskinen y Liou, 1979, 1987). Asimismo, Huebner y Flohr (1990) y Dasgupta *et al.* (1990) han sistematizado las asociaciones metamórficas con minerales de Mn atendiendo al tipo de protolito del que proceden. La importancia de las variables que deciden la cristalización de los minerales manganesíferos varía considerablemente en función de la fase que se considere. En el presente trabajo se pretende valorar la importancia relativa de dichos factores en la cristalización de ciertos silicatos de Mn mediante la aplicación conjunta de distintas técnicas estadísticas multivariantes —análisis de componentes principales (ACP) y análisis de correspondencias (AC)— a un conjunto de datos obtenidos a partir de un riguroso y selectivo estudio petrográfico y geoquímico de las litologías ricas en Mn que afloran en el área de Oliva de la Frontera (Ossa-Morena, Macizo Ibérico Meridional).

Contexto geológico

Las rocas ricas en Mn del área de Oliva de la Frontera están enclavadas en una unidad tectonoestratigráfica del cinturón sur-central de Ossa-Morena llamada por Apalategui y Sánchez (1991) unidad de Cumbres-Hinojales (fig. 1A). Dicha unidad presenta una secuencia estratigráfica que comprende desde el Cámbrico al Silúrico (fig. 1B) y que ha sido afectada por metamorfismo de esquistos verdes. Dentro de ésta aparece un complejo vulcano-sedimentario de edad Cámbrico superior-Ordovícico inferior (Complejo Vulcano-sedimentario de Zahinos) cuyo tramo inferior se caracteriza por la presencia de tobas cristalinas ácidas, pizarras y litologías ricas en Fe y Mn (fig. 1C; Ruiz de Almodóvar, 1983). El estudio petrográfico y geoquímico de estas rocas permite diferenciar distintos tipos de litologías manganesíferas: tobas manganesíferas, cotículas, lechos de braunita, pizarras ricas en Mn y menas de Mn (Jiménez-Millán *et al.*, 1992). Las asociaciones minerales que caracterizan a dichas litologías aparecen en la tabla 1. La tabla 2 presenta análisis químicos representativos de cada una de las mismas.

La selección de las muestras para el presente es-

tudio se realizó teniendo en cuenta la abundancia de los tipos litológicos en la secuencia, por lo que se tomó un conjunto de 24 muestras distribuidas de la siguiente forma: 4 menas de Mn, 4 cotículas, 3 pizarras manganesíferas, 9 tobas manganesíferas (litología más abundante en el área de estudio) y 4 pizarras.

Técnicas estadísticas

El uso de las técnicas estadísticas multivariantes está plenamente justificado en los problemas geológicos en los que es necesario realizar una simplificación y reducción de una estructura compleja de datos a un espacio más reducido realizando transformaciones de las variables o muestras originales (Davis, 1986). En el ACP, esta transformación se realiza extrayendo un pequeño número de componentes, obtenidas mediante combinación lineal de las variables originales, que resaltan algunas características difíciles de diferenciar en el espacio de partida.

El AC (Benzécri, 1973; Greenacre, 1984) puede considerarse englobado en la misma familia de técnicas estadísticas por lo que, en esencia, pretende objetivos similares. Sin embargo, esta técnica es especialmente útil en geología (David *et al.*, 1974; Valençon, 1982; Pereira *et al.*, 1990) al permitir el tratamiento de variables cualitativas y de variables cuantitativas previamente divididas en clases, así como el tratamiento conjunto de ambos tipos de información. Γ -> forma resumida, el tratamiento de un conjunto de datos mediante AC parte de una tabla de doble entrada de frecuencias relativas (tabla de contingencia) o yuxtaposición de tablas de este tipo. Sobre esta tabla se realizan cálculos relativamente simples con el objetivo de obtener un espacio, de dimensiones menores al original, en el que son proyectados simultáneamente individuos y atributos. La obtención de la tabla de contingencia de entrada en el análisis de correspondencias requiere la realización de un conjunto de transformaciones de la matriz de datos original (Greenacre, 1984). El primer paso consiste en efectuar una codificación indicatriz de las variables, por medio de su división en clases, para obtener una matriz de tipo disyuntiva, $Z = [Z_1, \dots, Z_Q]$ (tabla 3). En esta matriz, cada Z_Q representa una submatriz indicatriz correspondiente a las diferentes clases de la variable Q (j_1, \dots, j_n) en cada una de las N muestras. El producto de esta matriz disyuntiva Z por su transpuesta Z^T da lugar a una matriz simétrica que cruza entre sí todas las clases de las variables existentes. Esta matriz, conocida como matriz de Burt, puede ser usada como matriz de entrada en el AC y presenta una estructura en bloques, como consecuencia de la superposición de tablas de contingencia, tal y como se muestra a continuación:

$$\begin{array}{cccc} Z_1^T Z_1 & Z_1^T Z_2 & \dots & Z_1^T Z_Q \\ Z_2^T Z_1 & Z_2^T Z_2 & \dots & Z_2^T Z_Q \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_Q^T Z_1 & \dots & \dots & Z_Q^T Z_Q \end{array}$$

Variables del sistema

Desde el punto de vista geológico, en la determinación de los factores críticos de la cristalización de las fases manganesíferas están implicadas tres clases de variables: mineralógicas, composicionales y físico-químicas.

La existencia de metamorfismo en las rocas ricas en Mn suele estar marcada por la aparición de silicatos de Mn. Por ello, para este trabajo se han to-

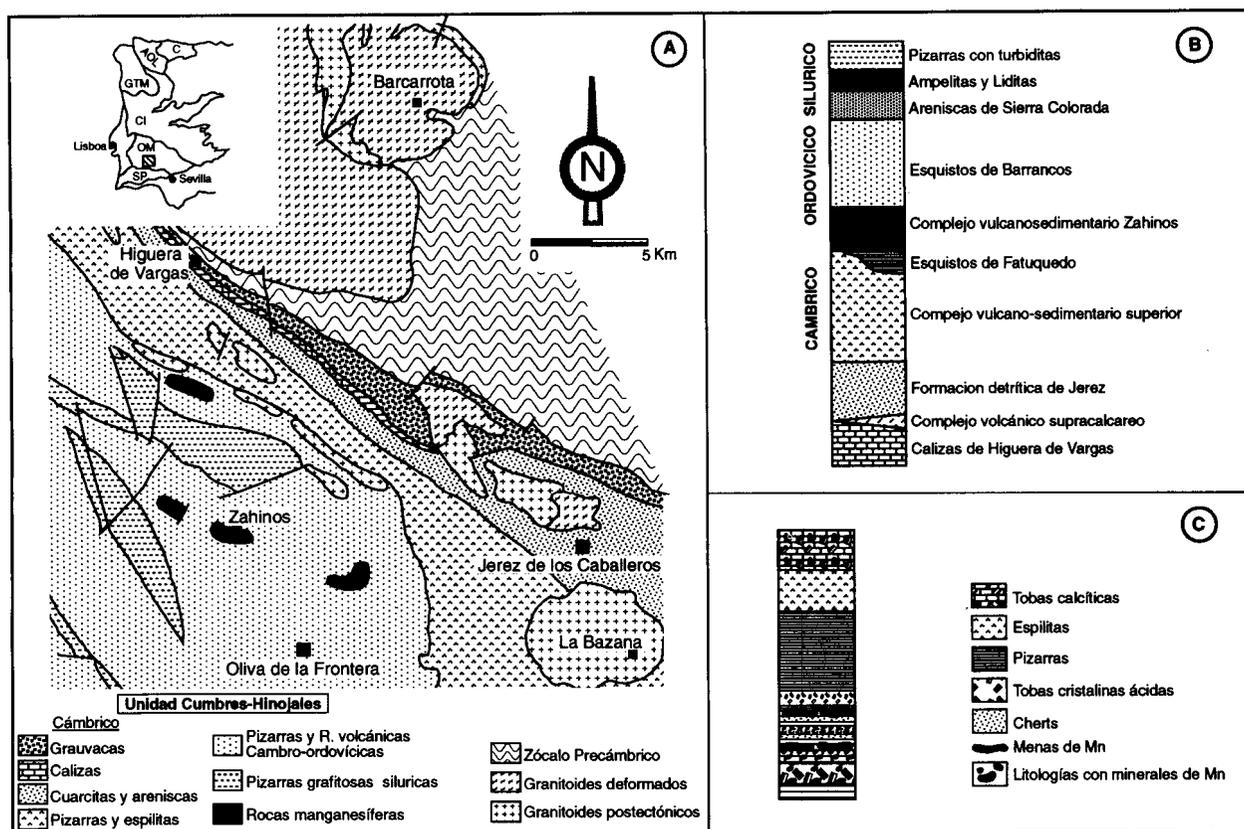


Figura 1.—(A) Mapa geológico del área de Oliva de la Frontera. (B) Serie estratigráfica de la Unidad de Cumbres-Hinojales en el área. (C) Serie esquemática del Complejo vulcano-sedimentario de Zahinos (basado en Vegas y Moreno, 1975; Ruiz de Almodóvar, 1983; y Apalategui y Sánchez, 1991)

Fig. 1.—A: Mapa geológico del área de Oliva de la Frontera. B: Serie estratigráfica de la Unidad de Cumbres-Hinojales en el área. C: Serie esquemática del complejo vulcano-sedimentario de Zahinos (basado en Vegas y Moreno, 1975; Ruiz de Almodóvar, 1983; y Apalategui y Sánchez, 1991).

mado como variables mineralógicas la presencia o ausencia en las rocas de 5 silicatos de Mn representativos de diversas asociaciones: espesartina, piemontita, tefroita, piroxenoide de Mn (piroxmangita o rononita) y anfíboles de Mn.

La elección de las variables composicionales se ha realizado teniendo en cuenta los cationes que entran mayoritariamente en la composición de las variables mineralógicas seleccionadas: Si, Ti, Al, Mg, Mn, Fe, Ca, Na y K.

Las variables físicas más influyentes en el metamorfismo de rocas manganíferas son la presión, la temperatura y la fugacidad de oxígeno. Las rocas del área de Oliva de la Frontera se localizan en una zona de metamorfismo regional constante, por la que todas ellas debieron sufrir condiciones de presión y temperatura muy similares. Por el contrario, el estudio de la asociación de óxidos presentes en estas rocas indica importantes diferencias en las condiciones de fugacidad de oxígeno de las mismas. De las fases

progradadas, la braunita es el óxido estable en las condiciones de mayor fugacidad de oxígeno (véase Abs-Wurmach *et al.*, 1983), por lo que su presencia o ausencia fue elegida como índice para diferenciar entre rocas con alta y baja fugacidad de oxígeno, respectivamente.

Desde el punto de vista estadístico, no todas las variables seleccionadas para este estudio son del mismo tipo. Así, las variables composicionales son de carácter claramente cuantitativo, mientras que las variables mineralógicas y la fugacidad de oxígeno se rigen por criterios de presencia-ausencia, debiéndose clasificar como cualitativas.

Análisis estadístico multivariante

Tratamiento de las variables cuantitativas

La primera etapa del tratamiento de datos consistió en poner de manifiesto las relaciones existentes

Tabla 1.—Asociaciones minerales de las litologías manganésíferas del área de Oliva de la Frontera

Asociaciones minerales	
Pizarras manganésíferas	— Moscovita + hematites + espesartina ± piemontita ± braunita ± clorita ± cuarzo
Tobas cristalinas manganésíferas	— Cuarzo + albita + hematites + espesartina ± piemontita ± braunita — Cuarzo + albita + hematites + magnetita + riebeckita Mn ± egrina ± dannemorita ± tirodita ± flogopita Mn ± espesartina
Cotículas	— Espesartina + cuarzo ± hematites ± rutilo ± ilmenita ± dannemorita ± turmalina ± zircón
Menas de Mn	— Rodonita o piroxangita + tefroita ± magnetita ± jacobsita ± rodocrosita ± calcita

Tabla 2.—Análisis químicos de las rocas del área de Oliva de la Frontera

	Si	Al	Ca	Mg	Na	K	Fe	Mn	Ti
<i>Menas de Mn con espinelas</i>									
Ag-16.....	11,92	2,13	0,78	0,42	0,09	0,04	19,06	29,89	0,14
Pn-7.....	15,52	4,41	0,51	0,22	0,07	0,17	8,80	26,80	0,30
ZHT-2.....	16,87	2,56	0,59	0,74	0,09	0,07	10,47	28,73	0,10
Pn-11.....	21,55	5,61	0,61	0,62	0,07	0,13	7,19	19,36	0,46
<i>Tobas con Mn</i>									
Nor-1.....	29,73	4,21	0,55	0,31	2,34	0,22	4,04	8,98	0,46
Nor-2.....	30,71	4,35	1,11	0,75	1,08	0,09	3,98	8,05	0,44
Nor-10.....	23,19	5,40	0,49	0,72	4,26	2,08	4,75	14,48	0,77
Nor-25.....	25,76	4,90	0,09	0,30	2,97	0,31	5,61	10,53	0,46
Nor-26.....	25,66	5,56	0,46	0,52	4,13	1,20	4,27	11,62	0,50
Pn-1.....	27,30	7,41	0,16	0,42	2,97	3,11	5,22	5,53	0,63
Pn-4.....	30,80	4,97	0,10	0,54	3,98	1,57	3,47	5,36	0,49
Pn-6.....	20,89	6,09	0,13	0,93	4,08	1,26	5,45	13,48	0,53
Pn-10.....	30,29	5,27	0,21	0,54	5,87	0,33	4,23	4,72	0,62
<i>Pizarras con Mn</i>									
Nor-3-B.....	19,49	6,19	1,11	1,25	0,33	2,18	9,49	15,02	0,29
Nor-3-P.....	24,31	11,43	0,86	1,32	0,25	4,86	5,37	2,40	0,49
Nor-27.....	18,18	13,92	0,63	1,01	0,23	5,12	5,39	9,29	0,47
<i>Cotículas</i>									
Nor-49.....	35,25	3,46	0,79	0,58	1,19	0,13	3,34	3,81	0,33
Nor-13.....	24,82	5,08	0,16	0,51	0,09	0,37	5,46	15,26	0,91
ZH-5.....	25,94	3,87	0,94	0,25	0,13	0,10	7,05	14,25	0,31
Nor-15.....	34,26	2,42	0,02	0,28	0,06	0,17	4,50	5,45	0,26
<i>Pizarras</i>									
Nor-30.....	32,44	9,21	0,20	0,89	0,19	4,57	1,41	0,13	0,19
Nor-56-P.....	23,79	7,73	0,06	0,98	0,87	3,00	15,99	1,03	0,41
ZH-3.....	40,67	2,79	0,11	0,36	0,47	0,97	1,57	0,26	0,18
Pn-8.....	24,21	10,48	0,03	1,30	1,22	8,30	5,63	0,36	0,62

entre las variables composicionales (cuantitativas). Con este fin, fue aplicado el ACP a las rocas manganíferas, ya que permitiría establecer las posibles asociaciones de elementos químicos y explicar de esta forma las correlaciones de las 9 variables composicionales mediante un número reducido de factores. En la elección del número de factores se ha de tener en cuenta la cantidad de procesos geológicos que, *a priori*, pudieron influir en la composición final de las rocas que se están estudiando. La petrografía de las litologías manganíferas del área de Oliva de la Frontera sugiere la existencia de, al menos, 4 fuentes diferentes de elementos químicos: a) la presencia de tobas indica una fuente volcánica; b) las litologías pizarrosas revelan un aporte detrítico; c) la existencia de carbonatos en algunas litologías sugiere una fuente de precipitación química o bioquímica; d) por último, una fuente ha de explicar el aporte de Fe y Mn a los distintos tipos de litologías. Siguiendo este criterio, se eligieron 4 componentes del ACP, las cuales fueron rotadas ortogonalmente mediante el método VARIMAX para obtener una distribución más significativa de los pesos de las variables en las componentes. Estas 4 componentes explican cerca del 90 % de la varianza del sistema (tabla 4). La primera componente (A) revela una fuerte asociación entre Mn y Fe, correlacionándose negativamente con Si. Esta componente puede relacionarse con el proceso geológico que dio lugar a las mineralizaciones de Mn y Fe. La segunda componente (B) agrupa a Al, Mg y K, por lo que se le puede asignar un origen detrítico. La tercera componente (C) concentra buena parte de la varianza del Ca, y en menor medida, del Mg. Esta asociación puede representar la existencia de un proceso de precipitación de carbonatos. La última componente (D) se correlaciona fuertemente con Na y Ti. La existencia de fenocristales de albita en las tobas cristalinas sugiere relacionar esta componente con una fuente volcánica de elementos.

A partir del ACP se crearon 4 nuevas variables (componentes A, B, C y D) obtenidas mediante combinaciones lineales de las nueve variables cuantitativas originales. Los valores de estas nuevas variables en las muestras se muestran en la tabla 5. Las cuatro componentes explican de forma sintética la variabilidad del sistema al poner de manifiesto las relaciones existentes entre las antiguas variables composicionales. Por ello, consideramos que la utilización de estas nuevas variables, en lugar de las variables individuales, podría poner de manifiesto más claramente el control de la composición del sistema sobre la cristalización de algunos minerales de Mn.

Tabla 3.—Matriz disyuntiva o indicatriz, con N muestras \times Q variables, donde cada variable se codifica en q clases. Se presenta una fila típica de este tipo de matrices (modificado de Greenacre, 1984)

	Z_1	Z_2	J_1, \dots, J_q	Z_Q
			⋮	
i	0 0 1	0 1 0 0	⋯	0 0 0 1
N			⋮	

Tabla 4.—Pesos de las variables en las componentes rotadas del ACP

	(A)	(B)	(C)	(D)
Si	0,953	-0,249	-0,061	0,097
Mn	-0,908	-0,295	0,033	-0,169
Fe	-0,862	-0,173	0,189	-0,260
Al	0,103	0,968	-0,030	-0,009
K	0,070	0,957	0,027	0,008
Mg	-0,049	0,724	0,565	0,140
Ca	-0,120	0,096	0,858	-0,324
Na	0,245	-0,060	-0,178	0,908
Ti	0,296	0,350	-0,435	0,539
% Varianza	29,509	29,914	14,657	14,954
% Varianza Acumulada	29,509	59,423	74,080	89,034

Tabla 5.—Coordenadas de las muestras en las componentes rotadas de las rocas con Mn del área de Oliva de la Frontera

	(A)	(B)	(C)	(D)
Ag-16	-2,50	-0,90	0,47	-0,40
Pn-7	-1,30	-0,49	-0,86	-0,93
ZHT-2	-1,45	-0,72	0,64	-0,45
Pn-11	-0,46	-0,10	-0,08	-0,53
Nor-1	0,77	-0,71	-0,07	-0,03
Nor-2	1,07	-0,54	1,76	-0,08
Nor-10	-0,35	0,36	-0,01	1,82
Nor-25	0,10	-0,47	-1,12	0,22
Nor-26	0,13	-0,16	0,07	1,09
Pn-1	0,40	0,76	-1,34	0,13
Pn-4	0,77	-0,14	-0,55	0,75
Pn-6	-0,58	0,35	-0,14	1,61
Pn-10	0,56	-0,45	-0,07	2,01
Nor-3-B	-0,57	0,68	2,12	0,00
Nor-3-P	0,58	2,30	0,94	-0,63
Nor-27	-0,20	2,69	-0,45	-1,05
Nor-49	1,62	-0,85	1,10	-0,57
Nor-13	-0,12	0,19	-1,71	-0,20
ZH-5	0,30	-0,82	0,44	-1,12
Nor-15	1,30	-0,96	-1,11	-1,62

Tratamiento conjunto de las variables cuantitativas y cualitativas

Con el objetivo de establecer la relación existente entre los tres tipos de variables geológicas consideradas en este trabajo, se eligió el AC como la técnica estadística multivariante más adecuada. La elección está justificada porque este método ofrece la posibilidad de trabajar con variables cualitativas y cuantitativas simultáneamente.

Las variables cualitativas mineralógicas fueron expresadas de forma disyuntiva en términos de ausencia (Min0) o presencia (Min1) de cada mineral en la muestra, excepto para el caso de la espesartina. Debido a la existencia de este mineral en la mayoría de las rocas estudiadas, decidimos codificar esta variable en tres clases: Sp1 para las muestras en las que está en proporciones muy bajas o ausente, Sp2 para las de proporciones intermedias y Sp3 para las de proporciones muy altas. La fugacidad de oxígeno fue tratada siguiendo el criterio expuesto anteriormente de asignar fugacidad de oxígeno baja (Ox0) para las muestras sin braunita y alta (Ox1) para las muestras con braunita.

La utilización de variables cuantitativas en el AC requiere la división de las mismas en clases y su posterior codificación en forma de variables de tipo indicatriz, asignando el valor 1 a la pertenencia a una clase y 0 a la no pertenencia. Por ello, se llevó a cabo una codificación disyuntiva de dos clases para las componentes B, C, y D. Dado que la componente A representa la relación entre los tres elementos (Mn, Fe, Si) que en mayor medida entran en la composición de los silicatos estudiados, se hizo una división de esta componente en 4 clases. El objetivo de esta codificación fue tratar de revelar la posible influencia de valores extremos de estos elementos en la cristalización de algunos minerales.

Esta recodificación de las variables cuantitativas y cualitativas dio como resultado la obtención de una matriz indicatriz o disyuntiva de 20×23 a partir de la cual se calculó la matriz de Burt correspondiente de 23×23 (tabla 6), sobre la que fue aplicado el AC. Ya que el objetivo que se persigue es poner de manifiesto la influencia de las variables físico-químicas en la cristalización de los silicatos de Mn, el número máximo de factores a seleccionar en el AC ha de ser igual al número de variables mineralógicas presentes en la matriz de datos. Así, en un caso ideal, cada factor llevaría asociado un mineral diferente cuya cristalización vendría explicada por las variables con pesos altos y del mismo signo en dicho factor. No obstante, es posible que sea suficiente un número inferior de factores para explicar correctamente la varianza del sistema debido a la asociación de minerales en factores comunes o a la incapacidad de las

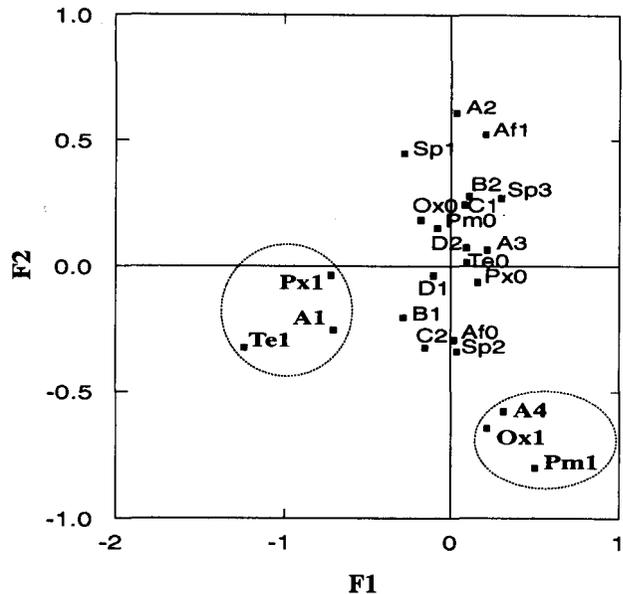


Fig. 2.—Proyección de las variables en el plano definido por los factores 1 y 2 del análisis de correspondencias (área de Oliva de la Frontera).

variables físico-químicas seleccionadas para explicar adecuadamente la cristalización de alguna de las fases consideradas. De acuerdo con lo expuesto, el AC fue efectuado seleccionando, en principio, los cinco primeros factores resultantes (tabla 7), los cuales consiguen explicar más del 90 % de la varianza.

La proyección de las variables sobre el plano definido por los dos primeros factores (fig. 2) revela la existencia de dos claras asociaciones de variables con pesos elevados en alguno de ellos:

a) Asociación entre las variables presencia de piemontita (Pm1), fugacidad de oxígeno alta (Ox1) y la clase más alta de la componente A (A4). Dichas variables tienen los pesos negativos más altos del factor 1, mientras que presentan pesos positivos no demasiado elevados en el factor 2.

b) Asociación entre las variables presencia de tefroita (Te1), presencia de piroxenoide (Px1) y la clase más baja de la componente A (A1). Este conjunto de variables se caracteriza por presentar pesos negativos muy altos en el factor 2, especialmente en el caso de la tefroita.

El resto de variables no tienen una explicación clara en este plano factorial.

El tercer factor está caracterizado por los elevados pesos positivos de la clase alta de espesartina (Sp3) contrarios a los que presenta la clase baja (Sp1). No obstante, estos pesos están muy alejados de los que tienen el resto de las variables en este factor.

Tabla 6.—Matriz de Burt obtenida a partir de la matriz disyuntiva correspondiente a las diferentes variables indicatrices de cada una de las muestras del área de Oliva de la Frontera

	A1	A2	A3	A4	B1	B2	C1	C2	D1	D2	Te0	Te1	Pm0	Pm1	Px0	Px1	Sp1	Sp2	Sp3	Af0	Af1	Ox0	Ox1
A1.....	5	0	0	0	3	2	2	3	3	2	3	2	4	1	2	3	2	3	0	4	1	4	1
A2.....	0	5	0	0	1	4	4	1	3	2	5	0	5	0	4	1	2	0	3	2	3	5	0
A3.....	0	0	5	0	2	3	1	4	2	3	5	0	4	1	4	1	2	1	2	2	3	3	2
A4.....	0	0	0	5	4	1	3	2	2	3	5	0	3	2	5	0	0	5	0	4	1	2	3
B1.....	3	1	2	4	10	0	4	6	6	4	8	2	8	2	7	3	3	6	1	8	2	7	3
B2.....	2	4	3	1	0	10	6	4	4	6	10	0	8	2	8	2	3	3	4	4	6	7	3
C1.....	2	4	1	3	4	6	10	0	5	5	10	0	10	0	9	1	2	5	3	5	5	9	1
C2.....	3	1	4	2	6	4	0	10	5	5	8	2	6	4	6	4	4	4	2	7	3	5	5
D1.....	3	3	2	2	6	4	5	5	10	0	8	2	8	2	7	3	1	4	5	9	1	8	2
D2.....	2	2	3	3	4	6	5	5	0	10	10	0	8	2	8	2	5	5	0	3	7	6	4
Te0.....	3	5	5	5	8	10	10	8	8	10	18	0	14	4	15	3	5	8	5	10	8	12	6
Te1.....	2	0	0	0	2	0	0	2	2	0	0	2	2	0	0	2	1	1	0	2	0	2	0
Pm0.....	4	5	4	3	8	8	10	6	8	8	14	2	16	0	11	5	6	6	4	8	8	14	2
Pm1.....	1	0	1	2	2	2	0	4	2	2	4	0	0	4	4	0	0	3	1	4	0	0	4
Px0.....	2	4	4	5	7	8	9	6	7	8	15	0	11	4	15	0	3	7	5	9	6	10	5
Px1.....	3	1	1	0	3	2	1	4	3	2	3	2	5	0	0	5	3	2	0	3	2	4	1
Sp1.....	2	2	2	0	3	3	2	4	1	5	5	1	6	0	3	3	6	0	0	1	5	5	1
Sp2.....	3	0	1	5	6	3	5	4	4	5	8	1	6	3	7	2	0	9	0	7	2	5	4
Sp3.....	0	3	2	0	1	4	3	2	5	0	5	0	4	1	5	0	0	0	5	4	1	4	1
Af0.....	4	2	2	4	8	4	5	7	9	3	10	2	8	4	9	3	1	7	4	12	0	7	5
Af1.....	1	3	3	1	2	6	5	3	1	7	8	0	8	0	6	2	5	2	1	0	8	7	1
Ox0.....	4	5	3	2	7	7	9	5	8	6	12	2	14	0	10	4	5	5	4	7	7	14	0
Ox1.....	1	0	2	3	3	3	1	5	2	4	6	0	2	4	5	1	1	4	1	5	1	0	6

Te: tefroita; Pm: piemontita; Px: piroxenoide; Sp: espesartina; Af: anfíbol con Mn; Ox: fugacidad de oxígeno.

La varianza explicada por los tres primeros factores del AC es próxima al 75 %. El resto de factores no presenta ninguna variable mineralógica con pesos altos y, además, explican una varianza inferior a la presentada por las variables consideradas individualmente, por lo que no es necesario tenerlos en cuenta para explicar los resultados.

Interpretación del AC

Las relaciones que resultan del AC efectuado ayudan a clarificar la importancia que presentan algunas variables físico-químicas en la cristalización de determinados minerales.

La asociación de la presencia de piemontita con la clase alta de la componente A refleja que para la formación de este mineral durante el metamorfismo no es necesario partir de un protolito enriquecido en Fe y Mn. Sin embargo, la estrecha relación existente entre la presencia de piemontita y la fugacidad de oxígeno alta revela que esta variable es la más crítica para la formación de esta epidota. Los trabajos experimentales sobre la estabilidad de la piemontita (Anastasiou y Langer, 1977; Keskinen y Liou, 1979, 1987) y las deducciones realizadas a partir de algu-

nos estudios sobre la petrografía y quimismo de asociaciones con piemontita (Keskinen, 1981; Reinecke, 1986; Akasaka *et al.*, 1988; Fukuoka *et al.*, 1990) coinciden en afirmar la importancia de la fugacidad de oxígeno para la cristalización de la piemontita.

Por otra parte, la asociación entre presencia de piroxenoide de Mn y tefroita con la clase más baja de la componente A pone de manifiesto la existencia de un importante control composicional en la cristalización de estos dos minerales. Dado que la componente A presenta pesos negativos de Fe y Mn pero positivos para el Si, el resultado del AC indica que la formación de tefroita y piroxenoide se encuentra restringida a rocas de razón Si/(Mn + Fe) extremadamente baja. En este sentido, hay que señalar que los trabajos experimentales de Muan (1959) y Abs-Wurmbach *et al.* (1983) han mostrado que la aparición de tefroita sólo se produce cuando en los materiales de partida la razón Mn/Si tiene valores superiores a 1.

Por último, la existencia de pesos elevados de espesartina en el tercer factor, muy alejados de los pesos del resto de las variables en dicho factor, sugiere que la formación de espesartina durante el metamorfismo de rocas ricas en Mn no requiere condiciones físico-químicas muy restrictivas. Esta observación

Tabla 7.—Coordenadas de las variables y las muestras en los primeros cinco ejes factoriales del AC

	F1	F2	F3	F4	F5
A1.....	-0,187	-0,620	-0,026	-0,067	-0,252
A2.....	0,605	0,125	0,306	0,062	-0,135
A3.....	0,098	0,145	-0,239	0,421	0,305
A4.....	-0,516	0,349	-0,040	-0,416	0,083
B1.....	-0,267	-0,191	0,020	-0,140	0,184
B2.....	0,267	0,191	-0,020	0,140	-0,184
C1.....	0,267	0,150	0,174	-0,265	-0,037
C2.....	-0,267	-0,150	-0,174	0,265	0,037
D1.....	-0,105	-0,147	0,396	0,093	0,037
D2.....	0,105	0,147	-0,396	-0,093	-0,037
Te0.....	0,037	0,148	-0,016	-0,003	0,003
Te1.....	-0,331	-1,335	0,141	0,030	-0,031
Pm0.....	0,202	-0,097	0,026	-0,070	0,045
Pm1.....	-0,809	0,389	-0,106	0,282	-0,178
Px0.....	-0,008	0,242	0,054	-0,029	0,026
Px1.....	0,024	-0,726	-0,161	0,086	-0,079
Sp1.....	0,393	-0,299	-0,435	0,088	0,037
Sp2.....	-0,386	0,051	-0,033	-0,276	-0,041
Sp3.....	0,223	0,267	0,581	0,391	0,030
Af0.....	-0,330	-0,057	0,216	0,025	-0,006
Af1.....	0,495	0,086	-0,325	-0,038	0,009
Ox0.....	0,247	-0,133	0,103	-0,076	0,038
Ox1.....	-0,577	0,309	-0,239	0,176	-0,089
Ag-16.....	-0,458	-1,269	0,233	-0,075	-0,070
Pn-7.....	-0,163	-0,605	0,321	-0,401	-0,110
ZHT-2.....	-0,203	-1,400	0,048	0,135	0,008
Nor-10.....	0,691	-0,263	-0,500	0,209	-0,271
Nor-25.....	0,680	0,066	-0,224	-0,326	0,135
Nor-26.....	0,255	-0,091	-0,907	0,562	0,047
Pn-1.....	0,434	0,347	-0,308	-0,166	0,130
Pn-4.....	0,233	0,423	-0,217	-0,650	-0,095
Pn-6.....	0,596	-0,069	-0,395	-0,238	-0,357
Pn-10.....	0,340	-0,038	-0,633	0,188	0,657
Pn-11.....	0,731	0,310	0,586	0,118	-0,170
Nor-3-B.....	-0,706	0,243	-0,339	0,243	-0,733
Nor-3-P.....	-0,482	0,499	0,208	1,018	-0,019
Nor-27.....	0,460	0,257	0,835	0,155	-0,186
Nor-1.....	-0,483	0,392	-0,107	-0,630	0,133
Nor-2.....	-0,989	0,461	-0,327	-0,121	-0,018
Nor-49.....	-0,058	0,352	0,036	-0,013	0,057
Nor-13.....	0,460	0,257	0,835	0,155	-0,186
ZH-5.....	-0,056	0,010	0,444	0,506	0,709
Nor-15.....	-0,282	0,117	0,413	-0,668	0,338
% Varianza	31,43	25,11	17,65	12,03	4,97
% Varianza acumulada.....	31,43	56,53	74,18	86,21	91,18

coincide con el hecho de que la estructura del granate es la que mejor alberga cantidades importantes Mn en comparación con otros silicatos ferromagnesianos, lo cual facilita su formación en un amplio intervalo de condiciones físico-químicas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado con el soporte económico de los Grupos de Investigación de la Junta de Andalucía núms. 4.065 y 4.020, así como en el marco del proyecto de la DGICYT PB89/15.

Referencias

- Abs-Wurmbach, I.; Peters, Tj.; Langer, K. y Schreyer, W. (1983). Phase relations in the system Mn-Si-O: an experimental study. *N. Jb. Mineral. Abh.*, 146, 258-279.
- Akasaka, M.; Sakakibara, M. y Togari, K. (1988). Piemontite from the manganese hematite ore deposits in the Tokoro Belt, Hokkaido, Japan. *Mineral. Petrol.*, 38, 105-116.
- Anastasiou, P. y Langer, K. (1977). Synthesis and physical properties of piemontite, $Ca_2Al_{3-p}Mn_p^{3+}(O/OH/SiO_4/Si_2O_7)$. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 60, 225-245.
- Apalategui, O. y Sánchez, R. (1991). Síntesis y correlación de unidades en el borde meridional de la Zona de Ossa-Morena (ZOM): implicaciones geológicas. *Bol. Geol. Min.*, 102, 339-347.
- Benzecri, J. P. (1973). *L'Analyse des donnees, Tome II, L'Analyse des correspondences*. Dunond, París, 619 págs.
- Dasgupta, S.; Banerjee, H.; Fukuoka, M.; Bhattacharya, P. K. y Roy, S. (1990). Petrogenesis of metamorphosed manganese deposits and the nature of the precursor sediments. *Ore Geol. Rev.*, 5, 359-384.
- David, M.; Campiglio, C. y Darling, R. (1974). Progresses in R- and Q-mode analysis: correspondence analysis and its application to the study of geological processes. *Can. J. Earth Sci.*, 11, 131-146.
- Davis, J. C. (1986). *Statistics and data analysis in geology*, 2.ª ed., Wiley, New York, 646 págs.
- Fukuoka, M.; Mondal, A.; Guha, D. y Chattopadhyay G. (1990). Petrochemistry of piemontite-bearing assemblages in calc-silicate rocks from Sausar Group, India. *J. Geol. Soc. India*, 36, 403-412.
- Huebner, J. S. y Flohr, M. J. K. (1990). Microbanded manganese formations: protholiths in the Franciscan Complex, California. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 1502, 72 págs.
- Greenacre, M. J. (1984). *Theory and applications of correspondence analysis*. Academic Press, London, 364 págs.
- Jiménez Millán, J.; Ruiz de Almodóvar, G. y Velilla, N. (1992). Litologías manganesíferas del área central de Ossa-Morena (SW de Badajoz). *Geogaceta*, 12, 46-49.
- Keskinen, M. (1981). Petrochemical investigation of the Shadow Lake Piemontite Zone, eastern Sierra Nevada, California. *Amer. J. Sci.*, 281, 896-921.
- Keskinen, M. y Liou, J. G. (1979). Synthesis and stability relations of Mn-Al piemontite, $Ca_2MnAl_2Si_3O_{12}(OH)$. *Amer. Mineral.*, 64, 317-328.
- Keskinen, M. y Liou, J. G. (1987). Stability relations of Mn-Fe-Al piemontite. *J. Metam. Geol.*, 5, 495-507.
- Muan, A. (1959). Phase equilibria in the system manganese oxide-SiO₂ in air. *Amer. J. Sci.*, 257, 297-315.
- Pereira, H. G.; Costa e Silva, A.; Soares, A.; Ribeiro, L. y Carvalho, J. (1990). Improving reservoir description by using geostatistical and multivariate data analysis techniques. *Math. Geol.*, 22, 879-913.

- Reinecke, T. (1986). Crystal chemistry and reaction relations of piemontites and thulites from highly oxidized low grade metamorphic rocks at Vitali, Andros Island, Greece. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 93, 56-76.
- Ruiz de Almodóvar, G. (1983). *Mineralizaciones de Mn-Fe y de W en el área de Oliva de la Frontera (SO de Badajoz)*. Geología y génesis. Tesis doctoral. Univ. de Granada.
- Valençon, F. (1982). The use of correspondence analysis in geochemistry. *Math. Geol.*, 14, 4, 331-342.
- Vegas, R. y Moreno, F. (1975). *Mapa Geológico de España, 1:50.000. Hoja 853, Villanueva del Fresno*. IGME, Madrid.

Recibido el 8 de enero de 1993
Aceptado el 30 de abril de 1993