

una zona de valores intermedios de mayor desarrollo en extensión que al otro lado del río Adaja y, finalmente, una tercera zona de valores máximos que, como en la margen izquierda corresponden a las aguas muestreadas cerca del Duero y, además, a las aguas situadas en la margen derecha del río Cega.

La presencia en este sector de una amplia zona de valores de conductividad intermedios, se debe por un lado a una mayor complejidad de la red de flujo, como se sabe muy condicionada por la topografía, con frecuentes y a veces extensas zonas de descarga en las que afloran sistemas de flujo más profundos y más mineralizados. Estos en la margen izquierda del río Adaja sólo se manifiestan en las proximidades del curso del Duero.

La vecindad de relieves residuales del Páramo, constituidos por rocas de composición margo yesífera, da lugar a sistemas de flujo locales con agua muy mineralizada debido a la elevada

solubilidad de la roca. Estos flujos pueden aflorar como tales, o bien, mezclados —en zonas de descarga de mayor entidad— con flujos regionales, ocasionando una gran diversidad de tipos de agua.

Por último, la zona de mayor mineralización corresponde, al igual que en la margen izquierda del Adaja, a la descarga regional del acuífero, que se sitúa en el entorno del río Duero, reflejando los altos valores obtenidos el importante grado de evolución que alcanzan las aguas. Además, esta elevada mineralización en el sector nororiental corresponde a la influencia de los flujos procedentes del Páramo, donde la composición margo yesífera de las rocas implica una intensa disolución de las mismas, por lo que las aguas subterráneas se cargan de sales desde los primeros momentos de su circulación y dan lugar a aguas de conductividad muy alta. Este fenómeno, en la Comarca de Olmedo, da lugar a valores altos

de conductividad, pero inferiores a los que se alcanzan en dicho sector nororiental, debido a la mayor proximidad de las rocas margo yesíferas del Páramo en esta última.

#### Agradecimientos

Al Proyecto CAICYT PB85-0229-co2, que financia estas investigaciones.

#### Bibliografía

- Freeze, R. A. y Cherry, J. A. (1979): *Groundwater*. Ed. Prentice-Hall. New Jersey.
- Bernaldez, F. G.; Herrera, P.; Sastre, A.; Rey, J. M.; Vicente, R. (1987): *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, 9, 19-34.
- I.G.M.E. (1980): *Investigación hidrogeológica de la Cuenca del Duero*. Col. Informe. Ministerio de Industria.

Recibido el 10 de febrero de 1989  
Aceptado el 15 de febrero de 1989

## Dinámica del proceso de alteración ambiental de la «piedra de Villamayor»

J. A. Blanco (\*).

(\*) Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, 37008 Salamanca.

#### ABSTRACT

*The Villamayor sandstones, Upper Paleocene in age, are composed of strongly arkosic fluvial sediments. The sediment is organized in sequences of decreasing grain size of which only one part can be exploited for construction purposes. The principal feature of the environmental alteration of the stone is its conversion to sand which is caused by two different processes. The first is the selective hydrolysis of certain clay minerals of the cement such as chlorites and smectites. The second is the activity of precipitates of magnesium sulphate hydrated to different extents (epsomite, hexahydrate, pentahydrate and starkeyite); the annual cycle of this activity is summarized in fig. 4.*

**Key words:** *Villamayor sandstones, environmental alteration, Salamanca, hydrolysis, magnesium sulphate.*

*Geogaceta*, 6 (1989), 32-35.

#### Introducción

En los últimos años se ha realizado una serie de trabajos sobre el proceso de alteración de la Arenisca de Villamayor —piedra ornamental de los monumentos salmantinos— y sobre

sus mecanismos correctores. Entre estos trabajos se destacan los de Vicente (1983), Vicente *et al.* (1986), y la monografía que recopila varios artículos publicada por la Caja de Ahorros y el M. de P. de Salamanca (1984). En todos ellos se señala la alta porosidad de la piedra de Villamayor como el principal condicionante de su alterabilidad y la arenización, que se produce en la superficie

de la piedra, como el resultado más importante de su alteración. En cuanto a las causas de la alteración ambiental, se señalan específicamente tres:

— la erosión física producida por los agentes atmosféricos (ciclos de hielo-deshielo y la acción eólica).

— la acción bioquímica en las partes expuestas a la colonización vegetal y

— los procesos selectivos de diso-

Trabajo realizado dentro del proyecto 1113-84 de la CAYCIT con la colaboración de B. Fernández Macarro y S. Sánchez Macías.

lución e hidrólisis, que afectan a los componentes del cemento de la arenisca, unidos a la precipitación superficial de sales.

La mayoría de los trabajos citados están de acuerdo en señalar la tercera como la más importante. Vicente *et al.* (op. cit.) estiman que la cristalización superficial de sales es más activa en el proceso de arenización que la hidrólisis selectiva de componentes del cemento.

El objetivo de esta nota es aportar nuevos datos al conocimiento de los mecanismos de alteración química de la Arenisca de Villamayor y, en especial, de la dinámica de la cristalización superficial de sales.

**La piedra ornamental en el contexto de las Areniscas de Villamayor**

En dos trabajos recientes, Alonso Gavilán *et al.* (en prensa) y Blanco *et al.* (en prensa), se hace una descripción detallada de la sedimentología y de algunos procesos de alteración que han afectado a las Areniscas de Villamayor. A partir de estos trabajos se ha elaborado el siguiente resumen a fin de dar una definición, lo más precisa posible, de la roca sana.

La Arenisca de Villamayor es una litofacies de la Formación Areniscas de Cabrerizos de edad Paleógeno Superior y toda ella es de origen fluvial. Esta litofacies está organizada en secuencias granodecrecientes que forman una macrosecuencia negativa. Cualquiera de las secuencias empieza por arenas de grano medio-grueso para terminar por arenas finas y limos arcillosos. La figura 1 ilustra una de estas secuencias, sitúa en ella la parte explotable como piedra ornamental y hace un resumen semicuantitativo de su composición mineralógica. Esta composición está condicionada por los tres hechos siguientes:

— se trata de un sedimento fuertemente arcósico procedente de áreas madres no-alteradas y sedimentado en condiciones semi-áridas (gran cantidad de granos detríticos de clorita y feldespatos);

— con posterioridad a la sedimentación se produce una ligera alteración de los minerales más lábiles (neoformación de esmectitas) debido a la alta porosidad de la parte inferior de cada secuencia que permite una cierta circulación horizontal del agua y

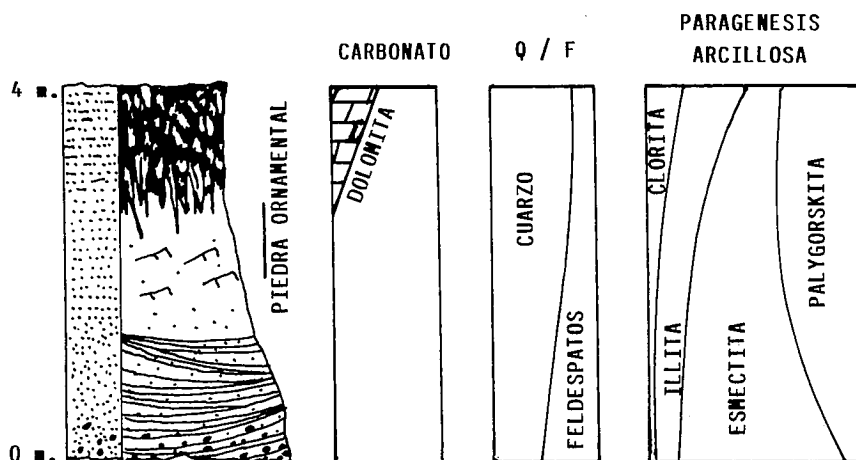


Fig. 1.—Secuencia ideal definida en las areniscas de Villamayor, representaciones semicuantitativas de sus variaciones mineralógicas (según Alonso Gavilán *et al.*, en prensa) y localización de la piedra ornamental en la secuencia.

— también, tras el depósito, la actividad de los paleosuelos desarrolla a techo de cada secuencia un perfil de alteración caracterizado por la aparición de encostramientos carbonatados incipientes y por una moderada transformación argílica (génesis de dolomita y palygorskita).

**Dinámica del proceso de arenización**

**A) Disoluciones e hidrólisis selectivas de los componentes minerales del cemento de la arenisca**

En la fig. 2 se han representado cuatro difractogramas que cubren todo el espectro de alteración de la piedra de Villamayor. El inferior corresponde a la roca sana en cantera y el superior a una arenización extrema, ya caída al suelo, de un monumento salmantino. Como puede verse, la clorita es la fase mineral más inestable, puesto que cuando se inicia, el proceso de arenización ha desapare-

cido por completo. Las esmectitas siguen idéntico camino, pero retrasando su completa desaparición hasta la arenización extrema. De acuerdo con Vicente *et al.* (op. cit.), la hidrólisis de las cloritas y de las esmectitas libera el hierro que, una vez oxidado a ion férrico, será fijado por la roca contribuyendo a dar la coloración tan típica de los monumentos salmantinos. El aumento de palygorskita a medida que progresa la arenización podría interpretarse como una neoformación, presumiblemente, realizada a expensas de los productos de hidrólisis de cloritas y esmectitas. Sin embargo, la variación de la relación cantidad total de arcilla sobre cantidad de cuarzo no sugiere neoformaciones arcillosas sino, más bien, su destrucción progresiva a medida que avanza la alteración. La illita y las pequeñas micas tienen un comportamiento intermedio entre las esmectitas que disminuyen mucho y la palygorskita que presumiblemente se mantiene estable.

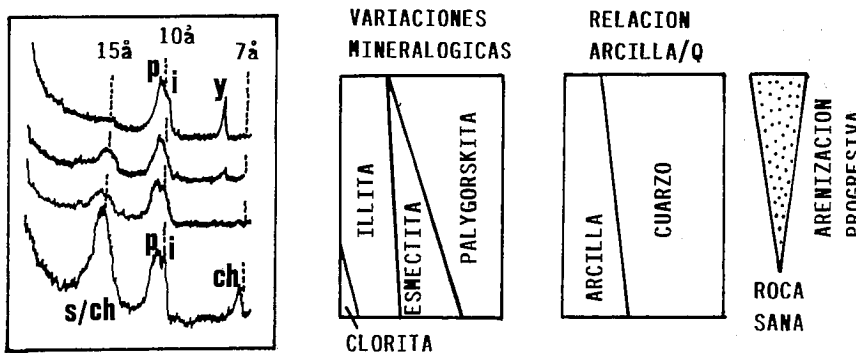


Fig. 2.—Variaciones mineralógicas producidas por procesos selectivos de hidrólisis de los materiales arcillosos del cemento.

Se puede afirmar, en función de lo expuesto, que el proceso de hidrólisis contribuye a aumentar la porosidad al disolver de forma selectiva algunos de los componentes del cemento. Como consecuencia de ello se debe producir, además, una pérdida de cohesión del cemento que abre el camino hacia la arenización.

Una variante del proceso de hidrólisis lo podría constituir la desaparición de la dolomita. Este mineral no forma parte del cemento de la arenisca sana, sino que está en pequeñas cantidades en forma de nódulos o encostramientos difusos. Se puede hablar de un verdadero proceso de dedolomitización, pues en las arenas nunca se ha detectado dolomita, encontrándose en cambio la calcita.

**B) Precipitación superficial de sales:**

A lo largo de 1987 y 1988 se ha realizado un seguimiento detallado del proceso de formación de los precipitados salinos que tiene lugar en determinadas zonas de los monumentos salmantinos. Estas zonas son principalmente las concavidades de pórticos y arcadas, la base de cornisas, barandillas y balaustradas y, sobre todo, en la base de los monumentos, allí donde la piedra se apoya sobre un zócalo más impermeable. Todas estas zonas tienen una característica en común: permiten aflorar el agua gravífica que, una vez infiltrada por todo el monumento, inicia una lenta migración hacia las partes bajas del edificio. El agua gravífica, e incluso el agua de retención superficial de los poros próximos a la superficie, puede alcanzar la saturación para una sal al aumentar su concentración salina por evaporación; sin embargo, la sal así precipitada puede redisolverse, si al continuar el aporte de agua, disminuye la evaporación.

En la fig. 4 se han intentado reflejar las principales conclusiones obtenidas a lo largo de estos dos años de observaciones. Los análisis de eflorescencias salinas, a fin de alcanzar cantidades fácilmente detectables, se han realizado allí donde la actividad salina es mayor; esto ocurre en los barrios topográficamente más bajos de la ciudad. Sin embargo, se ha verificado que la actividad de las sales es idéntica, pero en menor proporción, en las zonas monumentales más altas.

La actividad salina se manifiesta

por la precipitación de sulfatos hidratados de magnesio. Estos sulfatos tienen un ciclo anual que puede resumirse así:

— al final de primavera, cuando cesan las lluvias y la evaporación es importante, aparece gran cantidad de precipitados de Epsomita;

— durante todo el verano, en ausencia de lluvias y con fuerte evaporación, la sal va deshidratándose progresivamente; así se pasa de Epsomita (7 moléculas de agua) a Hexahidrita (6), Pentahidrita (5) y por último Starkeyita (4) (fig. 3);

— con las lluvias de otoño se produce una rehidratación brusca que hace aparecer nuevamente la Epsomita y

— durante el invierno, las lluvias y las nieblas unidas a la baja evaporación permiten una débil actividad salina.

Conviene señalar que no se trata de simples hidrataciones o deshidrataciones de sales, sino que hay verdadero cambio de fase mineral en cada uno de los pasos citados (Cuadro 1).

El proceso de arenización sigue, evidentemente, un ciclo paralelo a la actividad salina descrita. Al final de primavera la eclosión de la Epsomita, la sal más voluminosa, provoca la formación de escamas paralelas al borde externo de la piedra y, al cristalizar en los poros, una gran desagregación granular. Los cambios volumétricos provocados por los cambios de fase que se producen en verano, van liberando y haciendo caer granos, escamas y cristales de sales. La rehidratación de la Starkeyita, que vuelve a pasar a Epsomita en otoño, origina un gran cambio volumétrico que genera un máximo de arenización. El viento y las salpicaduras de las lluvias del invierno terminan por liberar los restos de sales y los granos y escamas sueltas.

El origen del Magnesio necesario para toda esta actividad salina es atribuible a los procesos selectivos de hidrólisis descritos anteriormente; la disolución de Clorita, de Esmectitas y la dedolomitización deben liberar la cantidad suficiente. El ión sulfato presenta un origen menos claro, pues la piedra de Villamayor no contiene ni sulfatos ni sulfuros. Según Serrano Plaza (1988) los canteros, para homogeneizar el color de la piedra, la trataban con una mezcla de yeso y «tierra de Siena». Como puede verse en

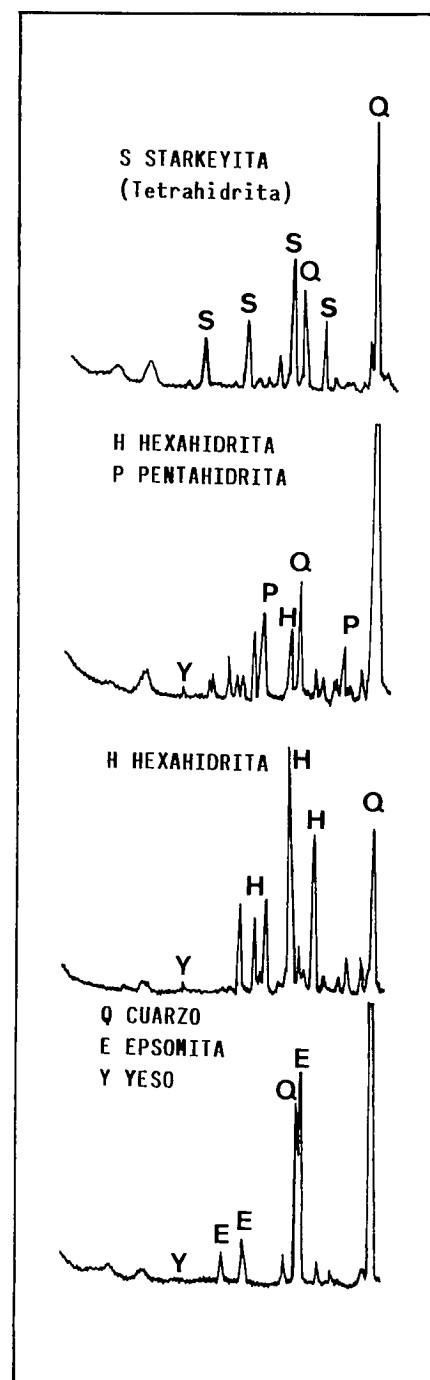


Fig. 3.—Secuencia de cristalización de sales a lo largo del período comprendido entre los meses de mayo y agosto.

la fig. 2 y 3 se han detectado trazas de yeso en diversas arenizaciones; su disolución podría liberar el ión sulfato necesario para la actividad salina. Sin embargo, el encontrar actividad salina, tanto en la piedra monumental, susceptible de haber sido tratada, como en la piedra de construcciones normales incita a pensar que el ión sulfato tenga otro origen, que bien pudiera ser la contaminación ambiental.

NOMBRE	FORMULA	SISTEMA	DENSIDAD	FICHA (ASTM)
EPSOMITA	$MgSO_4 \cdot 7 H_2O$	ORTORROMBICO	1,678	8 - 467
HEXAHIDRITA	$MgSO_4 \cdot 6 H_2O$	MONOCLINICO	1,76	24 - 719
PENTAHIDRITA	$MgSO_4 \cdot 5 H_2O$	TRICLINICO	1,90	25 - 532
STARKEYITA (TETRAHIDRITA)	$MgSO_4 \cdot 4 H_2O$	MONOCLINICO	2,01	24 - 720

Cuadro I.—Mineralogía de los sulfatos hidratados de magnesio

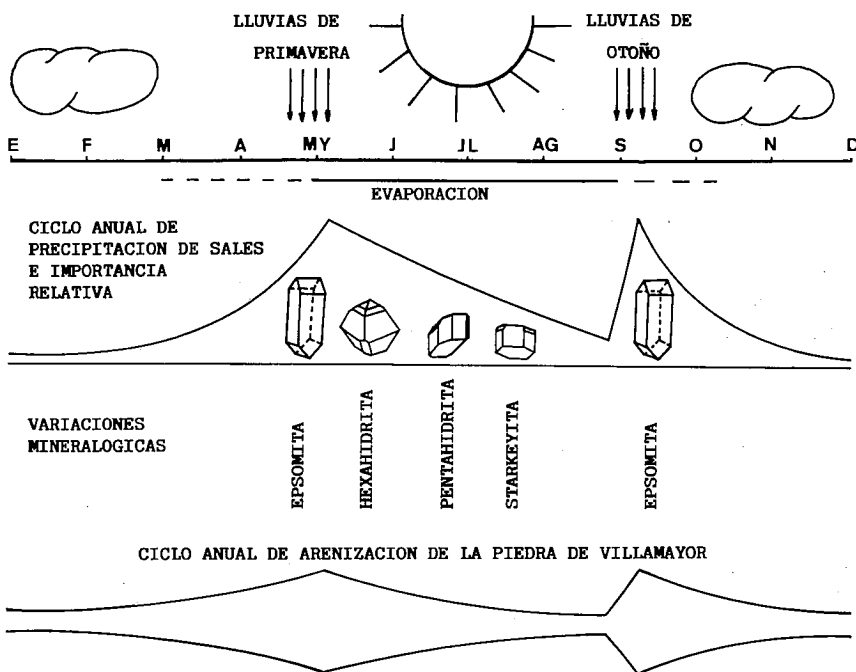


Fig. 4.—El ciclo anual de la actividad de los sulfatos de magnesio y de la arenización inducida.

### Conclusión

La manifestación más evidente de la alteración ambiental de la piedra de Villamayor —piedra ornamental de los monumentos salmantinos— es la arenización. Esta se produce, principalmente, por la interacción de dos procesos diferentes. El primero de ellos es la disolución e hidrólisis selectiva de minerales del cemento como son la Clorita y las Esmectitas. El segundo es la actividad salina de los sulfatos de Magnesio con diverso grado de hidratación; esta actividad presenta un claro ciclo anual que ha sido resumido en la figura 4. El origen del Magnesio es achacable a la hidrólisis de los minerales arcillosos y el del Sulfato es presumiblemente atribuible a la contaminación ambiental.

### Referencias

- Alonso Gavilán, G.; Blanco, J. A.; Sánchez Macías, S.; Fernández Macarro, B. y Santisteban Navarro, J. I. (en prensa): *Studia Geol. Salmaticensia*.
- Blanco, J. A.; Alonso Gavilán, G.; Fernández Macarro, B. y Sánchez Macías, S. (en prensa): *Studia geol. Salmaticensia*.
- Caja de Ahorros y Monte de Piedad de Salamanca (ed.) (1984): *Serie Monografías* nº 3, 565 p.
- Serrano Plaza, M. L. (1988): Tesis de Licenciatura; Univ. de Salamanca, 55 p.
- Vicente, M. A. (1983): *Clay Miner.* 18, 215-217.
- Vicente, M. A. and Brufau, A. (1986): *Appl. Clay Sci.*, 1, 265-272.

Recibido el 10 de febrero de 1989  
Aceptado el 15 de febrero de 1989

## Major Pleistocene and Holocene glacial episodes in the Khumbu region, southern side of Mount Everest (Nepalese Himalaya)

E. Martínez de Pisón (\*), J. López Martínez (\*\*).

(\*) Dpto. de Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Autónoma de Madrid. 28049 Madrid.

(\*\*) Dpto. de Química Agrícola, Geología y Geoquímica. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid. 28049 Madrid.

### RESUMEN

Se amplía hacia la vertiente meridional del Everest la cartografía de la geomorfología glacial realizada anteriormente por los autores en el sector tibetano de este macizo. Se distinguen cuatro fases glaciares principales desde el Pleistoceno a la Pequeña Edad del Hielo, con frentes morrénicos situados a las siguientes altitudes: 2.400 m, 4.330 m, 4.600 m y 4.926 m.

**Key words:** glacial geomorphology, glacial episodes, Pleistocene, Holocene, Khumbu, Everest.

*Geogaceta*, 6 (1989), 35-38.