

LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA COMO INDICADORA DE TEMPERATURAS DE CALCINACIÓN DE SUELOS. RELACIÓN CON EL CONTENIDO DE CALCIO

MAGNETIC SUSCEPTIBILITY AS PROXY OF SOILS CALCINATION TEMPERATURES. RELATION TO CALCIUM CONTENT

M. Gómez Samus; Y. Rico²; M., Gusso³; M., Canosa⁴; J. C. Bidegain⁵

¹Becario Post-Doctoral CONICET-LEMIT. gomez_samus@yahoo.com.ar

²Profesional principal CIC-LEMIT

³Personal Ley 10.430 CIC-LEMIT

⁴Técnico Adjunto CIC-LEMIT

⁵Investigador independiente CIC-LEMIT

RESUMEN

Este artículo constituye la continuación de un trabajo reciente, donde se reportó la influencia del carbonato de calcio (CaCO_3) inicial en las propiedades magnéticas de suelos calcinados a 1000°C en atmósfera de aire. Estos suelos están compuestos principalmente por silicatos y aluminosilicatos, con cantidades variables de CaCO_3 . Los estudios realizados evidenciaron que tras la calcinación, el calcio (Ca) promueve la formación de partículas ferrimagnéticas (tipo magnetita), en cambio, cuando el Ca está en bajas concentraciones, domina la señal de sustancias antiferromagnéticas como la hematita. Los materiales tratados en el presente trabajo corresponden a suelos con un amplio rango en el contenido de CaCO_3 , calcinados a temperaturas crecientes, desde 20° hasta 1050°C , en atmósfera de aire. Se realizaron determinaciones de elementos químicos mayoritarios, análisis gravimétricos y de susceptibilidad magnética (SM), con la finalidad de establecer con mayor claridad las temperaturas de aparición-desaparición de fases magnéticas en relación con el contenido de Ca. Frente a la calcinación y el posterior enfriamiento, la SM varió con relativa independencia del contenido de Ca hasta la aplicación de temperaturas de 900°C . A partir de esa temperatura los suelos más ricos en Ca se diferenciaron, adquiriendo los valores más elevados de SM. Las curvas gravimétricas no evidenciaron pérdidas de masa para temperaturas mayores a 800°C , de manera que los elevados valores de SM en las muestras con más Ca corresponden a transformaciones que no necesariamente implican reacciones de volatilización. Como una primera aproximación, planteamos que la presencia de calcio favorecería la incorporación de hierro en espinelas, del tipo magnetita-hercinita, formadas entre los 900 y los 1000°C . Se considera que el presente trabajo será de utilidad para el desarrollo de técnicas para la estimación de temperaturas de cocción de ladrillos y cerámicas, potencialmente aplicable a estudios arqueológicos y de patrimonio histórico-arquitectónico; también para la investigación de los efectos del fuego en los suelos y para la identificación de fases minerales vinculadas a procesos pirometamórficos.

Palabras clave: Sedimentos calcinados, Calcio, Magnetismo, Ladrillo, Cerámica, Incendio, Pirometamorfismo.

ABSTRACT

This article corresponds to an extension of a recent work which reported the influence of initial calcium carbonate (CaCO_3) on magnetic properties of calcined sediments at 1000°C under air atmosphere. These sediments were mainly composed of silicates and silicoaluminates, with varying amounts of calcium (Ca). It was evidenced that the Ca promotes the formation of ferrimagnetic particles after the calcination, whereas when the amount of Ca are low, the signal of antiferromagnetic substances (as hematite) dominates. The analyzed materials in the present paper correspond to soils with a wide range of Ca content, calcined by increasing temperatures (from 20° to 1050°C) in air atmosphere. Chemical and gravimetric determinations as well as magnetic susceptibility (MS) measurement were performed in order to establish the presence of magnetic phases in relation with temperature variations and Ca content. MS varies regardless of Ca content until the application of temperatures of 900°C . From this temperature, the Ca-rich soils were differentiated, acquiring the highest values of MS. The thermogravimetric curves did not show mass losses for temperatures higher than 800°C , so that the high values of MS in the Ca-rich samples correspond to transformations that do not involve devolatilization reactions. As a first approach, we propose that the presence of Ca would facilitate the iron incorporation in spinel of magnetite-hercynite type, formed between 900 and 1000°C . We consider that the present investigation should be useful for studying bricks and ceramics calcination temperatures, as well for archaeological and historical-architectural heritage studies. In addition, it may be useful for investigating the effects of fire on soils and the mineral phases identification associated with pyrometamorphic processes.

Keywords: *Calcined sediments, Calcium, Magnetism, Brick, Ceramic, Fire, Pirometamorfism*

INTRODUCCIÓN

Numerosos artículos, principalmente relacionados con el estudio de ladrillos, cerámicas y cementos, abordan el análisis de las fases minerales de suelos calcinados [1-8]. En algunos de estos trabajos se ha destacado que el contenido de calcio (Ca) afecta considerablemente la mineralogía resultante tras calcinar los suelos. Las bajas concentraciones de dicho elemento favorecen la formación de hematita y a medida que se incrementa el Ca, las cantidades de ese óxido de hierro se reducen considerablemente [3].

Hasta el momento, la influencia del Ca en las propiedades magnéticas de suelos calcinados prácticamente se desconoce. Como una primera aproximación Gómez Samus y colaboradores [9] resaltaron la influencia del CaCO_3 inicial en las propiedades magnéticas de suelos loessicos de la provincia de Buenos Aires, tratados a 1000°C en atmósfera de aire. Cuando el contenido de Ca era bajo, se formaron abundantes sustancias

antiferromagnéticas (hematita), pero al incrementarse la concentración de Ca, la presencia de fases ferrimagnéticas se hizo cada vez más notoria. Además, el proceso térmico produjo una proliferación sustancial de nanopartículas con propiedades superparamagnéticas (SP) en todas las muestras. Si bien el artículo mencionado representa un avance respecto al tema, debe ser ampliado y mejorado. Por ello, la finalidad del presente trabajo es identificar con mayor exactitud las temperaturas de transformación de fases magnéticas formadas en suelos calcinados. Esto ayudará a la construcción de un marco metodológico y técnico, aplicable al estudio de diversos procesos, como los ocurridos durante la cocción de ladrillos y cerámicas, y a la determinación de temperaturas de cocción en materiales arqueológicos y patrimoniales. Además se considera de utilidad para el estudio de los efectos producidos por incendios y para la identificación de procesos en rocas pirometamórficas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Suelos analizados

Las muestras analizadas (n=74) corresponden a sedimentos loessicos del área de Tandil-Balcarce-Mar del Plata (Provincia de Buenos Aires, Argentina), cuyas edades van desde el Mioceno tardío al Holoceno. Se destacan por su homogeneidad granulométrica, mineralógica y química; aunque con variaciones locales en el contenido de CaCO₃. La composición granulométrica corresponde principalmente a arenas limosas y limos arenosos, con incremento de arcilla en niveles edafizados. La mineralogía de la fracción arena y limo grueso corresponde a plagioclasa, cuarzo, ortoclasa, vidrio volcánico, feldspatos alterados, fragmentos de rocas volcánicas, ópalo organogénico y minerales pesados como “óxidos de hierro”, anfíboles y piroxenos [10-12]. Entre los argilominerales predominarían la illita y las esmectitas, con muy baja proporción de caolinita [13]. La composición magnética de las muestras aquí tratadas es relativamente homogénea, con dominio de minerales ferrimagnéticos (titanomagnetitas), en general de Dominio Simple [14].

Técnicas y equipamientos

Las muestras fueron secadas al aire, molidas y cuarteadas, luego se realizaron los análisis que se detallan a continuación.

Mediante un espectrómetro para fluorescencia de rayos-X modelo SPECTRO IQ, fue posible la determinación y cuantificación de Na, Mg, Ca, Si, Al y Fe, expresados como óxidos (Tabla 1).

Todas las muestras fueron calcinadas a 1000°C durante 2 h en una mufla de aproximadamente 13.850 cm³, en atmosfera de aire. Ocho muestras, con contenidos variables de CaO (tomadas en la localidad de Ramos Otero), fueron tratadas desde su estado natural hasta 1050°C, a intervalos de temperatura creciente. Primero se calentaron en

estufa durante 24 h a 110°C, posteriormente se trataron en la mufla a 255, 360, 455, 550, 650, 750, 850, 900, 950, 1000 y 1050°C, durante 2 h en cada paso. La diferencia de masa obtenida luego de cada intervalo de calcinación fue utilizada para construir las curvas termogravimétricas de la figura 1a.

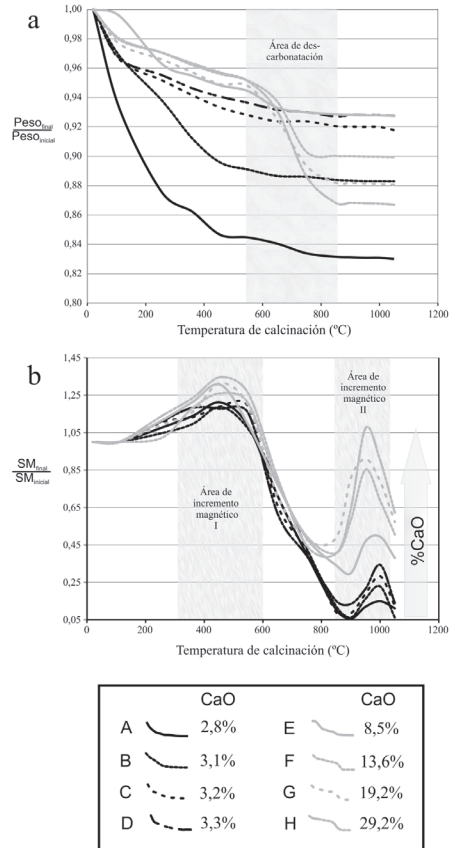


Figura 1. Curvas termogravimétricas (a) y de susceptibilidad magnética en relación con la temperatura de calcinación (b) de las muestras de la localidad de Ramos Otero.

La susceptibilidad magnética (SM) es la capacidad de los materiales de magnetizarse en presencia de un campo magnético externo. Este parámetro se determinó tanto en las muestras sin calcinar, como en las tratadas a distintas temperaturas, enfriadas al aire. Para ello se utilizaron susceptibilímetros MS2 y MS3 Bartington. Las muestras tratadas a 1000°C se midieron en baja (470 Hz) y en alta frecuencia

Tabla 1. Composición química de elementos mayoritarios expresados como porcentaje en óxidos, susceptibilidad magnética (SM) expresada en $10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ y factor susceptibilidad dependiente de la frecuencia (F%) de los suelos calcinados a 1000°C enfriados al aire.

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	SM	F%		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	SM	F%
Villa Caicque	5,0	4,8	15,7	59,6	1,8	3,4	7,0	84,0	10,0	Maria Ignacia Vela	6,2	4,4	10,7	39,5	1,2	30,5	5,1	271,8	8,2
	5,4	4,8	15,9	59,8	1,8	3,4	7,0	80,0	10,5		4,3	4,4	16,1	60,6	1,6	3,3	7,5	70,9	10,2
	5,1	4,7	16,1	59,7	1,8	3,4	6,9	79,7	10,3		4,9	4,0	15,8	61,0	1,6	3,5	6,8	97,7	10,2
	5,7	4,8	16,2	59,1	1,8	3,3	7,0	77,8	10,5		5,1	4,1	16,1	60,9	1,5	3,6	7,0	83,1	10,6
	5,2	5,1	16,4	59,1	1,9	3,1	7,2	73,9	10,5		4,9	4,1	17,6	58,3	1,5	3,2	8,1	93,6	10,1
	4,9	4,8	16,3	59,2	1,9	3,0	7,6	80,8	11,2		4,8	4,5	17,4	57,7	1,5	3,3	8,2	62,4	10,3
	5,3	5,1	16,2	57,5	1,9	3,8	7,3	83,6	8,6		4,3	4,3	17,1	59,3	1,5	3,5	7,7	74,0	9,4
	5,4	5,1	15,8	59,1	1,8	3,3	7,2	96,9	10,4		4,7	4,2	16,7	59,2	1,6	3,5	7,7	86,3	8,5
	5,3	5,3	15,9	59,1	1,8	3,3	7,1	84,8	9,2		5,2	3,7	14,2	56,5	1,6	6,5	9,0	74,0	9,3
	5,4	5,4	16,1	58,8	1,8	3,3	7,0	80,1	10,4		4,7	4,2	15,6	59,9	1,5	3,2	8,0	74,1	8,7
	4,5	5,3	16,1	58,2	1,9	3,1	8,0	78,0	10,2		5,5	4,6	16,1	60,3	1,7	2,8	7,3	82,4	10,0
	5,6	4,8	15,2	57,0	2,3	4,4	7,7	66,0	10,0		5,0	4,3	14,9	59,9	2,7	3,8	7,0	85,8	9,9
	5,6	5,7	14,9	56,9	2,3	3,9	7,5	85,8	10,4		5,3	4,2	15,0	59,9	2,5	3,9	6,5	78,7	9,8
	5,9	4,8	15,1	61,1	2,5	3,1	5,4	275,7	11,3		5,5	4,2	15,3	57,2	2,2	5,2	6,7	66,7	6,3
5,6	4,0	14,3	57,2	2,7	6,7	5,5	125,9	10,6	5,0	4,4	15,4	56,7	2,1	5,2	7,4	62,4	8,8		
6,0	4,3	13,9	55,9	2,7	8,9	5,6	172,5	10,8	5,5	3,7	14,6	58,8	2,6	6,5	5,9	82,3	11,9		
5,9	4,4	14,7	59,7	2,9	3,9	5,8	129,3	10,8	5,3	3,7	14,8	59,6	2,7	4,5	6,2	67,1	9,6		
Tandil	3,2	3,7	15,4	62,0	2,5	3,9	6,4	61,9	10,4	4,8	3,9	14,0	55,8	2,5	10,2	5,9	117,7	8,7	
	3,1	3,3	15,2	61,7	2,3	5,4	6,5	70,3	10,6	5,0	3,9	15,1	61,1	2,8	3,6	6,0	56,9	9,0	
	3,4	3,5	15,1	60,5	2,7	5,3	6,6	84,3	10,8	4,7	4,6	14,7	60,7	2,6	5,4	6,0	138,5	9,6	
	3,2	3,7	14,9	58,3	2,5	8,9	6,3	101,0	10,2	4,3	4,7	14,1	57,5	2,4	9,1	6,2	160,3	9,6	
	2,9	3,9	12,9	47,3	1,9	21,4	6,9	143,8	11,6	3,5	5,4	16,3	59,4	2,7	3,4	7,9	98,5	9,5	
	3,5	5,3	16,9	58,1	2,7	3,6	7,8	70,6	9,8	4,9	4,6	15,2	60,3	2,7	4,3	6,6	191,2	11,2	
	3,1	4,0	16,9	59,5	2,5	4,0	7,2	89,9	10,0	3,8	4,7	18,0	58,0	2,3	2,9	9,0	53,3	10,0	
	3,2	3,7	16,8	62,0	2,1	3,3	6,7	47,6	10,4	4,1	4,5	12,6	51,2	2,4	17,7	6,1	247,8	10,1	
	3,2	3,1	13,7	59,8	2,4	6,2	7,0	116,8	10,7	4,6	3,9	15,8	62,0	2,7	3,9	6,0	97,3	10,6	
	3,4	4,7	15,5	56,4	2,7	6,8	7,4	94,4	9,5	5,7	2,5	14,3	64,0	2,2	3,1	5,3	57,1	11,3	
	4,0	3,4	14,4	61,6	2,8	5,0	5,8	70,4	9,8	5,4	3,7	18,5	57,0	2,4	2,8	7,3	61,6	11,4	
	3,3	4,3	16,3	60,1	2,1	3,3	7,5	55,4	11,0	4,9	3,9	16,5	59,6	2,6	3,2	6,4	91,7	11,8	
	4,0	3,6	15,8	61,4	2,6	3,5	6,4	107,2	10,9	5,3	4,0	15,4	59,9	2,8	3,3	6,2	93,5	11,0	
	3,6	3,8	13,4	57,2	2,3	11,2	6,1	164,6	10,1	5,9	4,2	10,0	40,7	1,9	29,2	5,5	227,9	9,2	
3,7	3,8	14,4	61,8	2,8	4,3	6,1	95,1	9,6	6,3	4,4	11,7	47,9	2,2	19,2	5,7	181,5	10,6		
Maria Ignacia Vela	5,8	3,1	14,8	60,5	1,9	6,1	5,8	100,4	9,8	5,7	4,4	13,6	56,5	2,6	8,5	5,8	150,2	10,4	
	4,6	4,5	9,4	37,1	1,0	36,2	5,0	206,6	10,5	5,6	4,6	12,5	53,0	2,4	13,6	5,8	199,4	9,7	
	5,6	4,9	14,7	59,4	1,8	5,9	6,0	122,3	9,6	4,9	5,0	14,4	53,5	2,7	8,0	6,2	132,2	8,5	
	4,5	4,6	10,7	41,8	1,2	29,8	5,4	171,7	8,7	4,4	4,9	14,9	60,5	2,8	3,8	5,6	177,3	10,3	
		4,9	15,4	59,1	1,8	4,1	7,7	130,1	9,6		3,9	9,0	35,5	1,6	39,3	4,6	388,5	11,1	
Mar del Plata																			

(4700 Hz) con un sensor MS2B; con estos valores se calculó el factor susceptibilidad dependiente de la frecuencia (F%), que responde a la presencia de nanopartículas SP. Los valores de SM (baja frecuencia) y F% de las muestras naturales y calcinadas a 1000°C se indican en la tabla 1. Las muestras de la localidad de Ramos Otero, tratadas a temperaturas crecientes, se analizaron con un sensor MS2F y se construyó la curva de la figura 1b con los valores de SM normalizados.

Dado que el tratamiento térmico origina variaciones en el color, que responden a las transformaciones mineralógicas ocurridas, este fue determinado en algunas muestras seleccionadas con un espectrofotómetro GARDNER Spectro-Guide.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Las muestras sin calcinar presentan matices castaños, relativamente homogéneos, típicos del loess pampeano. Los valores promedio en el sistema CIELab son L=50, a=5, b=11 y en el Munsell 7YR 5/2, con variaciones dependientes del contenido de CaCO₃, que influyen en la luminosidad y la intensidad del color. Las muestras calcinadas a 1000°C presentaron color “rojo ladrillo” cuando tienen escaso CaO (L=51, a=26, b=24; 10R 5/7), y amarillo cuando el CaO es elevado (L=71, a=-4, b=35; 6Y 7/5).

Los elementos químicos dominantes corresponden en orden decreciente de abundancia a SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃, mientras que Na₂O, MgO y K₂O se encuentran en proporciones bajas (Tabla 1). El CaO es el elemento de mayor variabilidad y condiciona los valores porcentuales del resto de los elementos. Si se recalculan los contenidos de estos últimos, dejando de lado el CaO, es evidente el elevado grado de homogeneidad de las muestras analizadas. Por ejemplo, en el triángulo composicional de la figura 2 se aprecia que la proporcionalidad de los elementos dominantes (SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃) es semejante para las 74 muestras.

Los valores de SM en las muestras calcinadas a 1000°C presentaron gran variación, entre 36 y 388 x10⁻⁸ m³/kg (Tabla 1). Presentan correlación muy fuerte y positiva con el contenido de CaO, es decir, los valores más elevados de CaO se corresponden con los más elevados de SM y viceversa (Fig. 3). En cuanto a los valores de F%, estos son elevados (promedio 10%) e indican una gran proporción relativa de nanopartículas SP, generadas durante el proceso térmico. F% no tiene relación con el contenido de CaO; el coeficiente de correlación entre ambos es muy cercano a cero.

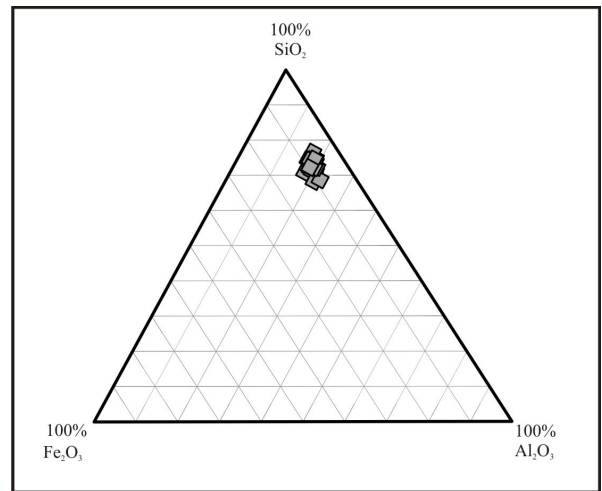


Figura 2. Triángulo composicional (SiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃) de las muestras analizadas. Note la homogeneidad en relación con los elementos graficados.

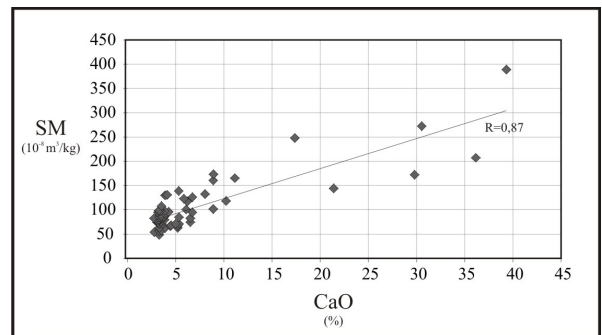


Figura 3. Diagrama de contenido de calcio (CaO) vs. susceptibilidad magnética (SM) de las muestras calcinadas a 1000°C. Note la fuerte dependencia de los valores de SM respecto del CaO.

En las curvas termogravimétricas de la figura 1 se observa la pérdida de masa de las muestras, la cual comienza a partir del inicio del tratamiento térmico. Las muestras A y B son las que presentan las caídas más abruptas, hasta temperaturas de 500°C. La muestra A tiene elevada proporción de argilominerales (corresponde a un horizonte pedogenético Bt), de manera que esta pérdida de masa se debería a la eliminación de agua higroscópica y a la deshidroxilación de esos minerales. La muestra B tiene elevado contenido de materia orgánica (es un horizonte A), de modo que la pérdida de masa correspondería principalmente a la combustión de dicho componente y también a la eliminación de agua higroscópica. El resto de las muestras, de texturas limo arenosas y sin evidencias de materia orgánica, presentan una pérdida de masa moderada hasta los 550°C. A partir de dicha temperatura, las curvas de las muestras E, F, G y H exhiben una caída que se prolonga hasta los 700 - 850°C. Estas muestras presentan abundante contenido de CaCO₃, evidenciado por los mayores valores de CaO así como por la reacción positiva al HCl en estado natural, de manera que esta última pérdida de masa se relacionaría con el proceso de descarbonatación. A partir de los 850°C ninguna muestra evidencia cambios sustanciales.

En las curvas de variación de SM en función de la temperatura de calcinación (Fig. 1b), es evidente que todas las muestras siguen un camino semejante hasta aproximadamente los 750°C, con un incremento de los valores de SM a temperaturas entre 300 - 600°C seguidos de una brusca caída. A partir de los 750°C el comportamiento de las muestras se diferencia, con dependencia del contenido de CaO. Las muestras con escaso CaO (<4%) siguen disminuyendo sus valores de SM, alcanzando mínimos a temperaturas de 900°C, para luego presentar un leve incremento hasta los 1000°C, que a juzgar por el color “rojo ladrillo” de las muestras, así como los resultados obtenidos en un trabajo anterior [9], correspondería a hematita. En cambio, los suelos que presentan mayor contenido de CaO (>8%) experimentan un significativo incremento de SM a partir

de los 800°C y alcanzan los valores máximos (considerablemente más elevados que los de las muestras con bajo CaO) a aproximadamente 950°C.

Los resultados obtenidos permiten constatar que el Ca influye de manera significativa en la composición magnética de suelos calcinados, generando fases fuertemente magnéticas a partir de los 850°C. Teniendo en cuenta las curvas de la figura 1 en forma conjunta, es evidente que el incremento magnético vinculado a las mayores proporciones de CaO se produce una vez finalizado el proceso de descarbonatación y a temperaturas donde no se observan transformaciones en las curvas termogravimétricas, de manera que el incremento magnético a elevada temperatura no implica reacciones de volatilización.

CONSIDERACIONES FINALES

Minerales magnéticos formados a elevada temperatura

Diversos autores indicaron que el incremento de Ca disminuye la formación de hematita en suelos calcinados entre 850 y 1050°C [3, 15, 5, 9]. Sin embargo no se ha determinado con claridad qué mineral o minerales portadores de hierro se forman en detrimento de dicho óxido. Maniatis y colaboradores [3] plantearon que la disminución en el contenido de hematita en muestras con elevado Ca se debería a que el hierro quedaría “atrapado” en la red cristalina de los silicatos y aluminosilicatos de calcio formados a altas temperaturas. Sin embargo, de acuerdo a Gómez Samus y colaboradores [9] esta hipótesis resulta contradictoria, pues el carácter diamagnético (o bien paramagnético) de estos silicatos y aluminosilicatos no explicaría la fuerte señal magnética resultante.

Como parte de la elaboración de una primera hipótesis, cabe mencionar que en xenolitos pelíticos, que habrían estado expuestos a temperaturas entre 750-900°C, se indicó la presencia de espinelas ricas

en hierro, de la solución sólida magnetita-hercinita ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-FeAl}_2\text{O}_4$) [16]. Teniendo en cuenta que la abundancia de Al y Fe en los suelos analizados es relativamente elevada, la formación de dichas espinelas resulta probable.

Actualmente se están realizando análisis específicos, que incluyen difracción de rayos-X, espectroscopia Mössbauer y microscopia de barrido electrónico, con la finalidad de poner a prueba la hipótesis planteada y así contribuir a dilucidar el origen de la fuerte señal magnética en suelos calcáreos calcinados a temperaturas elevadas.

Campos de aplicación

Los resultados que se derivan de esta investigación se consideran de interés para diversas disciplinas. Se destaca que las reacciones producidas durante la calcinación de suelos son análogas a las ocurridas en la fabricación de ladrillos y cerámicas. Dado que las propiedades magnéticas resultantes varían sustancialmente con la temperatura de calcinación, la aplicación de estas técnicas puede ser de utilidad para la determinación de las temperaturas de cocción de dichos materiales, aspecto que puede contribuir tanto a estudios de patrimonio arquitectónico como arqueológicos. Por ejemplo, en nuestro país, parámetros del magnetismo están siendo determinados en ladrillos de un sitio histórico en la localidad de Olavarría [17]. Estas determinaciones, en conjunto con análisis químicos y mineralógicos, permitieron estimar con mayor exactitud la temperatura utilizada para la cocción de esos ladrillos.

Por otro lado, distintos estudios destacaron que la ocurrencia de incendios condiciona las propiedades magnéticas de los suelos [18-22]. Un ejemplo de esta aplicación es desarrollada en suelos de la selva pedemontana de las Yungas jujeñas [23], donde la susceptibilidad magnética está siendo evaluada como indicadora de los efectos del fuego.

Finalmente, dado que las reacciones en cuestión

corresponden a procesos de alta temperatura y baja presión, este trabajo se considera de interés también para la petrología de rocas metamórficas, especialmente el pirometamorfismo y para el estudio de fases en el metamorfismo de contacto y para la evaluación de los efectos de la diagénesis en la mineralogía de rocas sedimentarias [24].

Además, cabe mencionar, que en sedimentos loessicos de la región pampeana es habitual hallar a las denominadas “tierras cocidas” y escorias. Las “tierras cocidas” corresponden a fragmentos de color rojo intenso, con cierta porosidad, semejantes a pedazos de ladrillo; estas se encuentran asociadas a escorias, de aspecto vítreo. Dadas las características de estos materiales, es evidente que se vinculan a procesos de elevada temperatura.

Actualmente se acepta que corresponden a productos derivados de impactos de asteroides [25], de modo que el estudio de la mineralogía magnética en materiales sedimentarios afectados por altas temperaturas se presenta también como una herramienta de utilidad para la investigación de fenómenos de impacto.

Agradecimientos

Los autores agradecen al LEMIT, a la CIC y al CONICET por el apoyo brindado para realizar este trabajo. Los análisis químicos y gravimétricos fueron realizados en el área de Química del LEMIT-CIC. Las determinaciones de susceptibilidad magnética fueron efectuadas en el Instituto de Física Arroyo Seco (CIFICEN-CIC-CONICET) y en el área de Paleomagnetismo del LEMIT-CIC. El color de las muestras se determinó en el Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Pinturas (CIDEPINT-CIC-CONICET).

REFERENCIAS

1. Tite, M.S., Maniatis, Y., 1975, Examination of ancient pottery using the scanning electron microscope. *Nature*, 257, 122-123.
2. Peters, T., Iberg, R., 1978, Mineralogical changes during firing of calcium-rich brick clays: *Ceram. Bull.* 57: 503-509.
3. Maniatis, Y., Simopoulos, A., Kostikas, A., 1981, Moessbauer study of the effect of calcium content on iron oxide transformations in fired clays: *Journal of the American Ceramic Society.* 64: 263-269.
4. Riccardi, M.P., Messiga, B., Duminuco, P., 1999, An approach to the dynamics of clay firing: *Appl. Clay Sci.*, 15: 393-409.
- 5.- Cultrone, G., Rodriguez Navarro, C., Sebastian, E., Cazalla, O., de la Torre, M.J., 2001, Carbonate and silicate phase reactions during ceramic firing: *European Journal of Mineralogy* 13, 621–634.
- 6.- Bauluz, B., Mayayo, M.J., Yuste, A., Fernandez-Nieto, C., Gonzalez Lopez, J. M., 2004, TEM study of mineral transformations in fired carbonated clays: relevance to brick making: *Clay Minerals*, 39, 333-344.
- 7.- Trindade, M.J., Dias, M.I., Coroado, J., Rocha, F., 2009, Mineralogical transformations of calcareous rich clays with firing: A comparative study between calcite and dolomite rich clays from Algarve, Portugal: *Applied Clay Science*, 42, 345-355.
- 8.- Rathossi C., Pontikes Y., Tsolis-Katagas P., 2010, Mineralogical differences between ancient sherds and experimental ceramics: Indices for firing conditions and post- burial alteration: *Bulletin of the Geological Society of Greece*, Proceedings of the 12th International Congress.
- 9.- Gómez Samus, M., Rico, Y., Ziccarelli, S., Parodi, A.V., Bidegain, J.C., 2017. Efectos del contenido de CaCO₃ inicial en las propiedades magnéticas de sedimentos calcinados. Resultados preliminares: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 69, 261-278.
- 10.- Teruggi, M.E., 1957, Nature and Origin of Argentine Loess: *Journal of Sedimentary Petrology*, 27.
- 11.- Teruggi, M.E., Spalletti, L.A., Dalla Salda, L.H., 1973, Paleosuelos en la Sierra Bachicha, Partido de Balcarce. *Revista del Museo de La Plata, Sección Geología*, 8: 227-256.
- 12.- Rabassa, J., 1973, Geología Superficial en la hoja “Sierras de Tandil”, provincia de Buenos Aires: *LEMIT* 240: 115-160.
- 13.- Camilion, M.C., 1993, Clay mineral composition of pampean loess (Argentina): *Quaternary International*, 17, 27-31.

- 14.- Gómez Samus, M.L., 2016, Magnetoestratigrafía y parámetros magnéticos en sedimentos del Cenozoico tardío del sector Tandil-Balcarce-Mar del Plata: La Plata, Argentina, Universidad Nacional de La Plata, Tesis Doctoral, 430p.
- 15.- Cultrone, G., 2001, Estudio mineralógico-petrográfico y físico-mecánico de ladrillos macizos para su aplicación en intervenciones del Patrimonio Histórico: Universidad de Granada, España. Tesis Doctoral, 293p.
16. Brearley, A.J., 1986, An electron optical study of muscovite breakdown in polytic xenolith during pirometamorphism: *Mineralogical Magazine*, 357, 385-397.
- 17.- Gayo, G.X., Merlo, J.F., Chaparro, M.A.E., 2015, Caracterización Mineralógica de los Ladrillos Constructivos de un Sitio Histórico de Olavarría-Provincia de Buenos Aires: 1° Jornada Nacional de Investigación en Cerámica, actas p13.
- 18.- Le Borgne, E., 1955, Abnormal susceptibility of topsoil: *Annales de Géophysique* 11, 399–419.
- 19.- Le Borgne, E., 1960, Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol et du granite: *Annales de Géophysique* 16, 159–195.
- 20.- Rummery, T.A., Bloemendal, J., Dearing, J., Oldfield, F., 1979. The persistence of fire-induced magnetic oxides in soils and lake sediments. *Annales de Géophysique*, 35, 103–107
- 21.- Gedye, S.J., Jones, R.T., Tinner, W., Amman, B., Oldfield, F., 2000, The use of mineral magnetism in the reconstruction of fire history: a case study from Lago di Origlio, Swiss Alps: *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 164, 101–110.
- 22.- Oldfield, F., Crowther, J., 2007, Establishing fire incidence in temperate soils using magnetic measurements: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 249: 362-369.
- 23.- Minervini, M.G., Morrás, H.J.M., Taboada, M.A., 2015, Susceptibilidad magnética como posible marcador de los efectos del fuego en suelos de la selva pedemontana de las Yungas jujeñas (resumen) en VI Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, Ushuaia, Argentina, 124-125.
- 24.- Roberts, P.A., 2015, Magnetic mineral diagenesis: *Earth-Science Reviews*, 151, 1–47.
- 25.- Zárate, M.A., Podgorny, I., 2011, Apuntes para una biografía científica de las escorias y “tierras cocidas” de las pampas. *Publicación Especial 12. Vida y obra de Florentino*.