



CARACTERIZACIÓN Y ESTUDIO DE LA ALTERABILIDAD DEL MATERIAL PÉTREO DE LA CATEDRAL DE SUCRE, BOLIVIA

Grandón-Soliz, C.J.^a, Castro-Borges, P.^b y Rojas, J.C.^c

^aFacultad de Ingeniería Civil, Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca, Sucre, Bolivia. cj_grandons@hotmail.com

^bCentro de Investigación y de Estudios Avanzados de la Unidad de Mérida, Mérida, México. pcastro@cinvestav.mx

^cCentro de Estudios de Posgrado e Investigación, Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca, Sucre, Bolivia. jcrojas@usfx.edu.bo

RESUMEN

La fachada, el atrio y la torre de la Catedral Metropolitana de Sucre fueron construidos con piedra, el principal material en esta estructura. La estructura pétreo actualmente presenta cambios de coloración, sales en su superficie y en los casos más críticos desprendimientos de fragmentos. El presente trabajo de investigación tiene como objetivos caracterizar el material pétreo de esta estructura y estudiar las diversas patologías presentes en la piedra; de este modo se podrá identificar los métodos apropiados para frenar, revertir y/o reparar los daños presentes. Con este propósito, fragmentos de piedra desprendidos de la estructura de la Catedral fueron retirados para su estudio en los laboratorios del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, México. Las muestras de piedra fueron analizadas a través de técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido, Difracción de Rayos X, Termogravimetría y Termografía Infrarroja. Los resultados muestran que el material pétreo es una roca sedimentaria arenisca silícea. Las causas de la aparición de costras negras, depósitos superficiales y eflorescencias en la superficie de la estructura pétreo son consecuencia de la exposición de la estructura al aire libre por lo que se encuentra desprotegida de los fenómenos climáticos y la contaminación urbana; provocando así un desgaste y la pérdida de material.

Una vez estudiado el material pétreo, las patologías y sus causas, se propone una intervención compatible con la piedra existente con el objeto de evitar acciones que puedan dañar más el patrimonio existente.

Palabras clave: Patrimonio Cultural, Conservación, Deterioración, Edificios Históricos, Piedra.

ABSTRACT

The facades, the atrium and the tower of the Cathedral of Sucre were built with stone, the main material in this structure. The stone structure currently presents changes in coloration, salts on its surface and in the most critical cases, fragment detachments. The objectives of this research study are to determine the origin and degree of the pathologies present in the stone; and identify the appropriate methods to stop, reverse and / or repair the present damages. For this purpose, fragments of stone detached from the structure were removed for study in the laboratories of the Center for Research and Advanced Studies of Mérida. The stone samples were analyzed through scanning electron microscopy, X-ray diffraction, thermogravimetry and infrared thermography. The results show that the stony material is a siliceous sandstone sedimentary rock. The causes of black crusts, surface deposits and efflorescence on the surface of the stone structure are a consequence of exposure to the open air because of the climatic phenomena and urban pollution; thus causing wear and loss of material. Once studied the stone material and the pathologies; a compatible intervention with the existing stone is proposed in order to avoid actions that may damage the existing heritage.

Key words: Cultural Heritage, Deterioration, Historical building, Stone.

INTRODUCCIÓN

La Catedral es el monumento religioso e histórico más grande de la ciudad de Sucre, Bolivia (Fig.1). Sucre fue declarado Patrimonio de la Humanidad el 13 de diciembre de 1991 cuando la UNESCO lo agregó a su lista de bienes culturales [1]. Los trabajos de construcción de la catedral, con estilo renacentista y barroco, comenzaron en 1551 y se completaron casi tres siglos después [2]. En 1700, comenzó la construcción de las fachadas utilizando material de las canteras de los cerros de Churuquella y Sicasica. En el año 1712 se edificó la torre de la catedral. Y finalmente, en 1808 se construyó el atrio con material también extraído de los cerros, cantera principal para la construcción de la Catedral [1].

En las últimas dos décadas, se han llevado a cabo estudios en la Catedral, éstos confirmaron el deterioro de varios elementos, incluida la piedra, pero dada la dificultad de no contar con tecnología especializada en el área, las intervenciones demostraron ser inadecuadas y contraproducentes. Y aunque la piedra se considera un símbolo de eternidad y durabilidad, muchos tipos de rocas son sensibles al medio ambiente al que están expuestos [3].

Dicho esto, es importante tener en cuenta que en Bolivia las rocas son bastante características según el período geológico en el que se formaron. Sucre es parte del territorio de Chuquisaca, que contiene restos fósiles de diferentes edades geológicas que abarcan 500 millones de años, pero sobre todo está marcado por la época del Cretácico, donde la región era un gran mar interior o lago y donde se depositaron capas rocosas de arenisca y piedra caliza. Luego, al referirse a las rocas que forman edificios con un valor histórico y cultural, la intemperie se concibe como su deterioro o degradación, ya sea por medios naturales o artificiales [4]. Los mecanismos de extracción, manejo, transporte y tallado ya pueden introducir modificaciones de las características originales de la piedra.

La catedral, ubicada en el centro de la ciudad, se ha visto afectada por las emisiones de contaminantes antropogénicos que induce el deterioro de la mampostería de piedra. Los problemas más comunes que sufre este tipo de piedra (es decir, la arenisca) son la formación de depósitos en la superficie, como las costras negras, la pátina y algunas especies de líquenes (Fig. 2), que causan una alteración en el color de la piedra [4]. También hay presencia de materiales depositados como polvo, excrementos de palomas y hollín [5]. La eflorescencia indica la presencia de sales solubles en la superficie de la roca producto de la humedad y las variaciones climáticas, causando la pérdida de material o lo que comúnmente se conoce como erosión (Fig.3) [6, 7].



Fig. 1. Fachadas, torre y atrio de la Catedral de Sucre.



Fig. 2. Fachada lateral con patinas de envejecimiento, pátinas bióticas y líquenes.



Fig. 3. Fachada principal (Vista interior) con costras negras y erosión.

El propósito del trabajo de investigación es doble. En primer lugar, caracterizar las piedras que constituyen las fachadas, torre y atrio de la Catedral. En segundo lugar, tiene como objetivo identificar las principales patologías que afectan a las piedras, así como sus causas. Este conocimiento permitirá a los profesionales de la conservación y restauración planificar estrategias para la correcta conservación-restauración del patrimonio cultural

principal de Sucre y establecer medidas adecuadas para frenar el proceso de deterioro.

MATERIALES Y MÉTODOS

Fragmentos de piedra desprendidos que no forman parte estructural de la Catedral, fueron tomados para obtener especímenes de muestras. Éstas pertenecen a la superficie de las portadas, atrio y torre de la Catedral, mismas que fueron colocadas en bolsas de plástico herméticamente cerradas y conservadas en condiciones de humedad y temperatura controlada. Las muestras se trasladaron desde Sucre, Bolivia hasta Mérida, Yucatán-México, lugar en donde se realizaron las técnicas de evaluación.

Se extrajeron nueve muestras representativas, las cuales están divididas en tres grupos de acuerdo al grado de deterioro (Fig. 4). El primer grupo (I-1, I-2, I-3) que representan visualmente a un grado de deterioro alto, el segundo grupo (II-1, II-2, II-3) muestra un grado de deterioro parcial y el último grupo (III-1, III-2, III-3) que visualmente tienen un grado de deterioro casi nulo.

Para el análisis de las técnicas de microscopía de rayos X, difracción de rayos X, y termogravimetría se extrajeron polvos (aproximadamente de 5 a 35 mg) de las nueve muestras de material pétreo, raspando con un pequeño cincel. Para la técnica de Termografía, se analizaron las muestras completas. Los especímenes tienen una longitud promedio de 10 centímetro y un diámetro de 5 centímetros.

En la siguiente sección, se describen los métodos de caracterización utilizados para determinar las propiedades físicas y químicas de las piedras, así como los procedimientos y los estándares seguidos durante la preparación y el análisis de las muestras.

2.1 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

Con el fin de identificar la caracterización mineralógica y química de las piedras, se realizó un microanálisis elemental (EDAX) utilizando un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-7600 F equipado con un microanálisis de energía de dispersión por rayos X. Los nueve especímenes fueron examinados por esta técnica. El objetivo de este análisis es identificar la posible presencia de patógenos en la superficie de la piedra [8]. Además, el análisis mineralógico y petrográfico es una parte integral del análisis de las piedras, no solo en la identificación de una coincidencia estética para una piedra de construcción sino también en la capacidad de cualquier posible incompatibilidad geotécnica que pueda conducir a un deterioro acelerado [9].

2.2 Difracción de Rayos X (DRX)

Para determinar la caracterización mineralógica, se utilizó la técnica de difracción de rayos X (DRX) utilizando un difractómetro Bruker con avance D-8 con geometría de Bragg-Brentano y radiación de Cu-K α monocromática ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$) empleando el tamaño de paso de escaneo de 0.02° , con un tiempo de paso de 0.5 s, en un rango de $5^\circ \leq 2\theta \leq 60^\circ$.

La identificación de las fases mineralógicas en los patrones de difracción obtenidos se realizó con el método de "búsqueda / comparación", utilizando la base de datos de los patrones de polvo del ICDD "Centro Internacional de Datos de Difracción" (PDF + 4, 2016). Una vez que se identificaron todas las fases mineralógicas y sus reflejos característicos, los resultados se analizaron a partir de los patrones de difracción de rayos X de las muestras primarias y se calcularon las proporciones relativas de cada componente considerando la intensidad de la reflexión principal (100%) de cada fase, en relación con la suma total de las intensidades de las reflexiones de todas las fases presentes en cada difractograma [10].

El porcentaje de cada fase se obtuvo aplicando la siguiente ecuación (Ec. 1):

$$\% \text{ Intensidad de } F_1 = 100 \left(\frac{I_{F1}}{I_{F1} + I_{F2} + I_{F3} + \dots + I_{Fn}} \right) \quad (1)$$

Donde: $I_{F1}, I_{F2}, \dots, I_{Fn}$ es la intensidad de cada fase presente.

2.3 Termogravimetría (TGA)

Para el análisis termogravimétrico, se determinó la pérdida de masa de las muestras en función de la temperatura utilizando un equipo Termogravimétrico (TGA, por sus siglas en inglés *Thermogravimetry Analysis*), de la serie DiscoveryTGA (TA Instruments). Las muestras se calentaron en un intervalo de temperatura a partir de 40°C hasta llegar a 900°C , con una rampa de temperatura de $15^\circ\text{C}/\text{min}$, seguido de una isoterma de 5 min a 900°C en un ambiente de aire (oxígeno O_2). La cantidad de muestra usada por cada prueba fue de aproximadamente 5 a 35 mg.

La termogravimetría (TGA) ofrecerá datos de durabilidad del material pétreo a partir de un envejecimiento artificial probando la resistencia de las muestras a través de una temperatura gradual que va desde los 40 hasta los 900 grados centígrados en un ambiente de aire (oxígeno O_2); con esta técnica se identifican pérdidas de humedad tanto superficial como la pérdida de humedad integrada en la muestra, estos fenómenos ocurre entre 150 a 250°C , y por encima de los 500°C , se tiene la descomposición química de los materiales orgánicos, lo que confirma que existe deterioro del material pétreo [11].

2.4 Termografía Infrarroja (TIR)

El equipo termográfico FLIR A20 fue utilizado en esta técnica, realizada en las nueve muestras de piedra. Esta técnica ofrece información de las capas superficiales del material a través de la medida de temperatura sin entrar en contacto con la muestra; es una técnica multidisciplinar porque no solo proporciona datos de temperatura, sino que también proporciona patrones térmicos, comportamientos y anomalías [12].

La TIR fue aplicada a las nueve muestras, las muestras fueron calentadas a 55°C en un horno, una vez alcanzada esta

temperatura, se da inicio con la medida de temperatura de las muestras con la cámara termográfica hasta llegar a igualarse con la temperatura ambiente (25 °C) o en su defecto, hasta llegar a una temperatura constante; la variación de temperatura en función del tiempo se muestra a través de una curva termográfica. Se utiliza la teoría de los mecanismos de transferencia de calor combinados para establecer el gradiente de temperatura que estará relacionado con la agresividad y el grado de deterioro de cada piedra aplicando la Ley de Enfriamiento de Newton.

La rapidez de enfriamiento de un cuerpo cálido en un ambiente más frío es proporcional a la diferencia entre la temperatura del cuerpo y la temperatura del medio ambiente (Ec. 2).

3. RESULTADOS

A partir del análisis MEB, se identificaron los elementos químicos de cada espécimen (Fig. 5). En las nueve muestras de piedra en polvo, los principales componentes detectados son oxígeno (O) y silicio (Si) (Tabla 1). Pero también se proporciona información sobre los componentes menores de las piedras estudiadas; identificando la presencia de elementos como carbono (C), fósforo (P) y azufre (S) (Tabla 1).

En el análisis DRX, se determinó la petrografía de cada espécimen, este análisis mostró la presencia de una composición química de cuarzo alta (> 90%) en todas las muestras analizadas (Tabla 2), típica de las rocas sedimentarias silíceas.

En la técnica TGA, si se registran pérdidas del contenido de agua de la muestra entre 150 a 250 °C y una descomposición química de materiales orgánicos por encima de 500 °C, se confirma el deterioro del material pétreo [11]. En este estudio, los termogramas de la técnica TGA mostraron que los nueve especímenes tienen diferentes grados de deterioro.

La termografía (TIR) es una técnica de inspección moderna destinada a detectar cambios de temperatura en las superficies mediante la visualización de la radiación infrarroja comprendida en un ancho de banda del espectro electromagnético, determinada por la gama de equipos utilizados [17]. Además resulta ser una medida a distancia sin la necesidad de contacto físico, sin luz visible y que al capturar la radiación infrarroja del espectro electromagnético, nos permite convertir esta energía en información de temperatura a través de cámaras termográficas [18, 19].

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

MEB identificó O y Si como los dos elementos de mayor proporción, siendo constituyentes característicos de la arenisca silícea sedimentaria, llamada cuarzo [13]. La tabla muestra valores más altos de C, P y S en los grupos I y II, lo que afirma que las muestras más deterioradas son las mismas que se eligieron visualmente desde el principio. Estos elementos no son característicos de las piedras sedimentarias, en cambio, se considera su presencia que proviene del material atrapado dentro de la estructura

mineral de las cortezas de deterioro [14]. Y también las costras de coloración negra son causadas por la presencia de azufre, que está relacionado con los procesos de combustión de origen antropogénico.

Además, el hierro (Fe) y el aluminio (Al) se detectaron mediante MEB, como se muestra en (Tabla 1). Estos elementos están relacionados con la presencia de pátinas en la superficie de la piedra, ya que los elementos principales son los vehículos motorizados y, en particular, los motores diésel. Este tipo de alteración también se conoce como películas negras [15].

Los resultados de las pruebas del análisis DRX confirman que los nueve especímenes de piedra de la Catedral corresponden a arenisca sedimentaria silícea.

Las sales solubles (es decir, carbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos de sodio, nitritos de sodio, potasio, calcio, magnesio y amonio) que se identificaron con la DRX en los tres grupos (Tabla 2), muestran el mayor porcentaje en los grupos I y II. La presencia de sales es el resultado de la actividad orgánica de los microorganismos, particularmente los líquenes [16]. Otra fuente de sales podrían ser los excrementos de palomas, estos animales son abundantes en el área.

En la técnica de la TGA, la muestra más deteriorada es la I-1, presentando el mayor porcentaje de pérdida de materia orgánica (10.87%); por otro lado, la muestra menos deteriorada es la III-1 (1.01%) (Fig. 6), que respalda la clasificación visual inicial de las nueve muestras según el grado de deterioro. La Tabla 3 muestra un resumen del porcentaje de pérdida de peso en los nueve especímenes. El TGA permitió saber que existen materiales (rocas silíceas) altamente estables frente a altas temperaturas, concluyendo que también son materiales pétreos con una gran durabilidad.

Aplicando la Ley de enfriamiento de Newton a las curvas termográficas del TIR, se determina el valor de k (constante que define la velocidad de enfriamiento) para cada muestra. Este valor ayuda a obtener un "tiempo característico" τ para enfriamiento. La figura 7 muestra el espécimen II-1 ($k = 0.0254$) con un tiempo característico de 39.37 segundos, y el espécimen I-1 ($k = 0.0110$) con un tiempo característico de 90.91 segundos. La comparación de las curvas termogravimétricas de las muestras nos permite observar que la muestra más deteriorada (I-1) tiene una pendiente menor, es decir, la muestra I-1 mantiene el calor en su superficie más tiempo porque presenta depósitos en la superficie y esto hace que tome más tiempo en disipar el calor sobre su superficie. Por otro lado, en la muestra menos deteriorada (II-1), el calor se disipa más rápido en la superficie porque no presenta contaminación.

En la estructura pétrea se han detectado áreas no afectadas, parcialmente afectadas y altamente afectadas donde, a partir de los resultados descritos, se recomienda el reemplazo de la piedra en lugares altamente afectados, para lo cual, el material de reemplazo debe tener las mismas características que la piedra original. Las costras, las pátinas, los depósitos superficiales y las eflorescencias presentes en las áreas que se ven ligeramente afectadas deben

eliminarse mediante la aplicación de chorro de arena y agua nebulizada. Finalmente, para prevenir el deterioro de las áreas no afectadas, es necesario aplicar un protector hidrofóbico que impermeabiliza la piedra, dándole mayor durabilidad.

5. CONCLUSIONES

Los nueve especímenes estudiados son areniscas silíceas sedimentarias. Los resultados de las pruebas TIR y TGA confirman la clasificación visual inicial de los tres grupos según el grado de deterioro de las piedras; donde el grupo I presenta el mayor grado de deterioro y el grupo III el más bajo.

Debido a que la Catedral de Sucre está ubicada en el centro de la ciudad, hace que su exposición al exterior sea mayor en un ambiente agresivo debido a la presencia de agentes agresivos como las emisiones de contaminantes antropogénicos, sales solubles, microorganismos (es decir, especies de líquenes) y excrementos de palomas en diferentes proporciones según el grado de deterioro de las piedras; causando el deterioro del material de piedra, dando lugar a lo que ahora se puede observar en las superficies de las fachadas, atrios y torres; tales como costras negras, pátinas y eflorescencias; además de causar desgaste y pérdida de material.

A partir de esta información es posible establecer una propuesta de conservación y reparación de la piedra de la Catedral de Sucre.

6. AGRADECIMIENTOS

Este estudio se realizó en los laboratorios de CINVESTAV (Mérida, Yucatán - México) bajo un convenio con la Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca (Sucre, Bolivia).

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Quintanilla, G. y Mons., J. (1964). Historia de la Iglesia de La Plata, Sucre: Seminario San Cristóbal.

[2] Gisbert, T. (1991). Historia de la vivienda y asentamientos urbanos en Bolivia., La Paz, PAIGH.

[3] Winkler, E. (1997). "Important agents of weathering for building and monumental stone", *Engineering Geology*, Vol. 1, No. 5, pp.381-400.

[4] Al-Algha, M. R. (2006), "Weatherinh of Building stones and its relationship to the sustainable management of the aggregate resources in Gaza strip, Palestine." *Building and environment*, Vol. 41, No. 5, pp. 680-681.

[5] Álvarez de Buergo, M., Fort, R. y Gomez-Heras, M (2004). "The Monastery of Uclés (Cuenca, Spain): Characterization and Deterioration of Construction Materials ", *Building Materials*, Vol. 54, pp. 5-22.

[6] Ortiz, R, et al. (2012), "Stratigraphic Study of Crusts and Deposits in Temples of the Historical Center of Seville" in *Journal of the Andalusian Institute of Historical Heritage*, No. 83, pp. 50-61.

[7] Grossi, C, y Esbert, R, (1994), "The Soluble Salts in the Deterioration of Monumental Rocks. Bibliographic Review", *Construction Materials*, Vol. 44, No. 235.

[8] Thomas, C, Lombillo, I, Setien, J, Polanco, J & Villegas, L, (2013), "Characterization of Materials with Repellents and Consolidants from a Historic Building", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 25, no. 11, pp. 1742-1751.

[9] Hyslop, E, McMillan, A, Cameron, D, Leslie, A, & Lott, G (2010), "Building Stone Database in the UK: A Practical Resource for Conservation", *Engineering Geology*, Vol. 115, pp. 143-148.

[10] Moore, D.M., Reynolds, R.C., (1989). "X-ray Diffraction, Identification and Analysis of Clay Minerals". Oxford University Press, New York.

[11] Klimesch, D, y Ray, A, (1997), "The use of DTA / TGA, to study the effects of ground quartz with different surfaces in autoclaved cement: Quartz paste. Use of semi-isothermal thermogravimetric technique". *Thermochemistry Act*, No. 306, pp. 159-165.

[12] Cusidó, J, Devant, M, y Riba, J, (1996), "Applications of Infrared Thermography and Spectroradiometry in the Study of the Deterioration of the National Architectural Heritage", *Construction Reports*, Vol. 48, No. 443.

[13] Bustillo, M, (1992). "Rocks and Siliceous Minerals for industrial use in Spain: Production and Sectorization", in García Guinea, J and Martínez Frías. *Coordinators Mineral resources of Spain. Superior Council of Scientific Investigations*, Madrid. pp. 1153 - 1167.

[14] Charola, E, Josef, P, y Michael, S, (2007), "Gypsum: a review of its role in the deterioration of building materials", *Geological Environment*. No. 52, pp. 339-352.

[15] Begonha, A. and Sequeira Braga, M, (1996), "Black and Fine Layers of Black Layers in Granite Monuments: Their Characterization and the Role of Air Pollution" in the VIII International Conference on the Deterioration and Conservation of Stone, Minutes of the International Congress on deterioration and conservation of stone, 1996, Berlin, Germany, September 30 to October 4, 1996, 1996, pp. 371-375.

[16] Alonso - Díaz, Pache - Esbert. (1994) "Stone-Environment Interaction. 1st Part. Forms of Alteration developed on the Stone of the Cathedral of Burgos". Eduardo Torroja Institute. Superior Council of Scientific Investigations. *Construction Reports* No. 433.

[17] Balaras, C, and Argiriou, A, (2002), "Infrared Thermography for Buildings Diagnostics", *Energy and Buildings*, Vol. 34, pp. 171-183.

[18] Melgosa, S, (2011), "Guide to Infrared Thermography. Applications in energy saving and efficiency ", Madrid, Gráficas Arias Montano, S.A.

[19] Prada-Pérez, F, (2016), "Infrared Thermography: an amazing resource for Physical Education and Chemistry", Eureka Magazine on Teaching and Dissemination of Sciences, Vol. 13, No. 3, pp. 617-627.



Fig. 4. Especímenes divididos en tres grupos: a, b, c - grupo I (visualmente presentan el mayor grado de deterioro); d, e, f - grupo II (muestran deterioro parcial) y; g, h, i - grupo III (visualmente no hay deterioro físico).

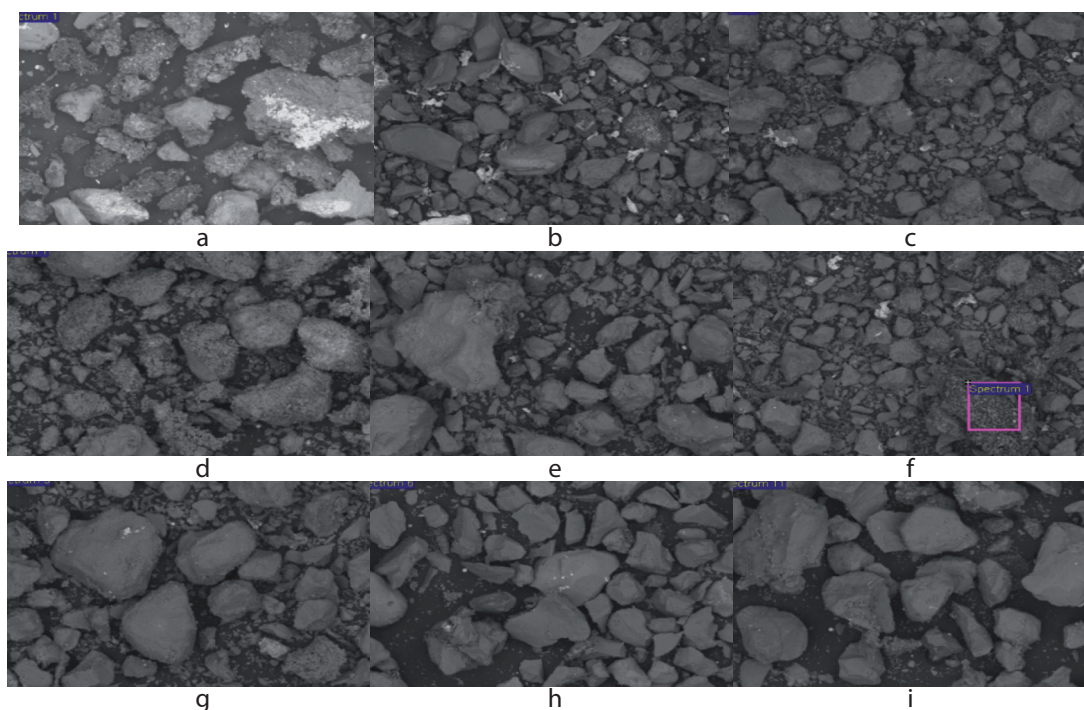


Fig. 5. Micrografías MEB de los nueve especímenes divididos en tres grupos: a, b, c - grupo I (visualmente

presentan el mayor grado de deterioro); d, e, f - grupo II (muestran deterioro parcial) y; g, h, i - grupo III visualmente no hay deterioro físico).

Tabla 1

Composición química de las piedras

Especimen	C	O	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe	Na	Mn
Porcentaje de composición en peso													
I - 1	43.44	44.09	0.28	1.57	7.06	0.21	0.23	0.59	0.72	0.50	1.30	0.00	0.00
I - 2	25.80	48.87	0.54	1.27	13.87	0.79	0.16	0.94	3.90	0.20	3.51	0.15	0.00
I - 3	18.21	52.79	0.14	3.18	21.9	0.00	0.00	0.90	0.57	0.00	1.96	0.00	0.37
II - 1	28.07	48.31	0.58	1.76	6.93	0.68	0.29	0.78	11.66	0.00	0.93	0.00	0.00
II - 2	24.24	50.85	0.25	3.01	18.47	0.00	0.25	1.07	0.41	0.00	1.45	0.00	0.00
II - 3	64.74	27.97	0.06	0.54	5.42	0.00	0.00	0.21	0.36	0.00	0.69	0.00	0.00
III - 1	3.33	44.3	0.17	1.91	7.36	0.25	0.00	0.42	0.36	8.33	33.57	0.00	0.00
III - 2	29.12	49.37	0.25	0.74	19.05	0.11	0.00	0.35	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00
III - 3	25.51	50.78	0.22	0.69	21.17	0.11	0.09	0.21	0.67	0.00	0.55	0.00	0.00
Porcentaje de composición de elementos													
I - 1	53.38	40.68	0.17	0.86	3.71	0.10	0.11	0.22	0.27	0.15	0.34	0.00	0.00
I - 2	35.85	50.98	0.37	0.78	8.24	0.43	0.08	0.40	1.62	0.07	1.05	0.11	0.00
I - 3	26.15	56.91	0.10	2.03	13.45	0.00	0.00	0.40	0.24	0.00	0.61	0.00	0.12
II - 1	38.62	49.90	0.40	1.08	4.08	0.36	0.15	0.33	4.81	0.00	0.28	0.00	0.00
II - 2	33.37	52.56	0.17	1.85	10.87	0.00	0.13	0.45	0.17	0.00	0.43	0.00	0.00
II - 3	73.03	23.69	0.04	0.27	2.62	0.00	0.00	0.07	0.12	0.00	0.17	0.00	0.00
III - 1	6.63	66.10	0.17	1.69	6.26	0.19	0.00	0.26	0.21	4.15	14.35	0.00	0.00
III - 2	38.73	49.29	0.16	0.44	10.84	0.06	0.00	0.14	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00
III - 3	34.68	51.82	0.15	0.42	12.31	0.06	0.04	0.09	0.27	0.00	0.16	0.00	0.00

Tabla 2

Porcentaje de minerales

Fases	I-1	I-2	I-3	II-1	II-2	II-3	III-1	III-2	III-3
Cuarzo	97.39	92.46	98.17	83.69	98.96	99.07	98.72	98.69	99.05
Poldervaartita	1.90	0.46	0.00	1.41	0.14	0.16	0.17	0.57	0.21
Nosean	0.41	0.35	0.42	0.25	0.43	0.44	0.41	0.38	0.38
Farringtonita	0.30	0.00	0.26	0.00	0.27	0.24	0.24	0.22	0.23
Calcita	0.00	1.04	0.00	7.48	0.00	0.09	0.14	0.14	0.00
Sanidina	0.00	0.68	0.00	1.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Illita	0.00	3.32	0.00	2.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Albita	0.00	0.53	0.00	1.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Brushita	0.00	0.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Weddellita	0.00	0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Alunogen	0.00	0.00	1.14	0.00	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00
Muscovita	0.00	0.00	0.00	1.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Dolomita	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00
Wardita	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00
Faujasita	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13

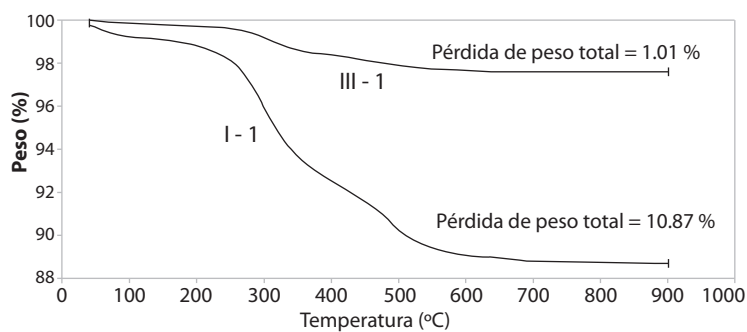


Fig. 6. Termograma Curvas de descomposición térmica del espécimen I-1 y del espécimen III-1

Tabla 3. Porcentaje de pérdida de peso en todos los especímenes (TGA)

ESPÉCIMEN	% TOTAL PESO PERDIDO
I-1	10.87
II-1	5.54
I-2	3.44
II-3	2.88
III-3	2.36
II-2	1.26
III-2	1.15
I-3	1.03
III-1	1.01

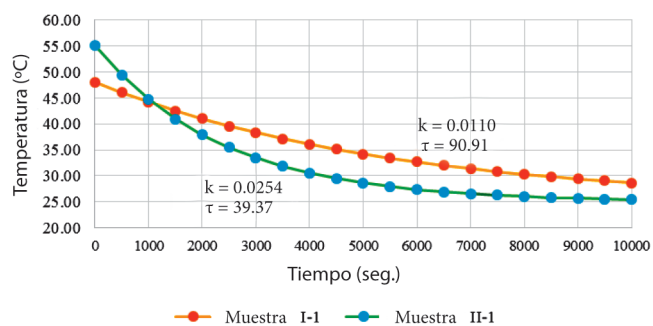


Fig. 7. Curvas termogravimétricas del espécimen I-1 y espécimen II-1