

Contribución de la química a la arqueología

Casimiro S. Munita

Instituto de Investigaciones Energéticas y Nucleares

Resumen

El trabajo presenta una breve reseña histórica de la contribución de la química a la arqueología. Los primeros estudios se remontan a los años 1700, cuyos autores tuvieron una importante participación en todas las áreas de la química, como Martin H. Klaproth, Humphry Davy, Karl Goebel, J. Berzelius, R. Fresenius, Michael Farady, Friedrich Kekulé, Jons Berzelius, Marcelin Berthelot, Louis Pasteur, entre otros. Estos destacados científicos incluyeron en su proceso de descubrimiento el estudio de objetos arqueológicos, porque visualizaban las potencialidades de la química para estudiar los objetos ancestrales.

Desde hace muchos años la química contribuye a la arqueología con trabajos destacados. Uno de los pioneros en realizar la caracterización química de objetos y materiales antiguos fue Martin Heinrich Klaproth (1743-1817) usando métodos gravimétricos de análisis. Entre sus primeros trabajos se destaca el análisis de seis monedas griegas y nueve romanas, en las cuales determinó cobre en la forma de precipitado insoluble. Los resultados de su trabajo al que llamó “Mémoire de Numismatique Docimastique” se presentaron el 9 de julio de 1795 en la “Royal Academy of Sciences and Belles-Letters” de Berlín y se publicaron tres años más tarde, en 1798¹. Cabe destacar que Klaproth fue de los primeros en hacer análisis químico cuantitativo, contribuyendo en forma significativa a la química analítica y a la mineralogía. Fue descubridor de varios elementos químicos, entre los cuales se encuentran: uranio, zirconio y telurio (1789), cromo (1797), cerio (1803) y fue el segundo en descubrir el titanio (1795). En su época, fue considerado uno de los principales químicos alemanes. Sus esfuerzos se compensaron con el nombramiento como primer profesor de química en la recién fundada Universidad de Berlín.

1) E.R. Caley, “Klaproth as a Pioneer in the chemical investigation of antiquities”, *J. of Chemical Education* N° 26, 1949, pp. 242-247; 268.

Sir Humphry Davy (1778-1829) fue conocido por su gran habilidad en investigación, intuición y rigor metodológico. Se destacó por descubrir dos importantes metales, sodio y potasio y separar bario, boro, calcio, estroncio y magnesio. Aportó a la arqueología con la publicación de un trabajo sobre el análisis de pigmentos antiguos de Roma y Pompeya en 1815².

Karl Christian Traugott Friedmann Goebel (1794 -1851), profesor de Química y Farmacia en la Universidad de Tartu, Estonia, analizó varios objetos antiguos. Los resultados se publicaron, en 1842, en un boletín, de apenas 38 páginas, que es considerado como uno de los trabajos clásicos de la química en arqueología³. En la época, él no solamente analizó una mayor cantidad de objetos arqueológicos que sus contemporáneos, sino que también se interesó en la interpretación de los datos obtenidos desde el punto de vista arqueológico e histórico. Fue el primer investigador en sugerir, explícitamente, que el análisis químico de los artefactos antiguos podría ser de gran utilidad a la arqueología.

Otros destacados científicos fueron Michael Faraday (1791-1867), que hizo importantes descubrimientos, como la inducción electromagnética y la construcción del primer generador de electricidad; Wilhelm Conrad Roentgen (1845 -1923), descubridor de los rayos X, razón por la que obtuvo el Premio Nóbel de Física en 1901. Cabe señalar que Roentgen convencido de que la ciencia debe estar al servicio de la humanidad y no del lucro, no aceptó patentar su descubrimiento y donó la recompensa del premio a la Universidad de Munich. El mismo año que descubrió los rayos X, en 1895, intentó realizar la primera radiografía en una pintura. Ya en esa época, Roentgen sugirió que esta nueva técnica ayudaría a la arqueología a identificar los falsos objetos de arte.

Por otro lado, el químico Friedrich August Kekulé von Stradonitz (1829-1896), aportó a la industria petroquímica y de plásticos con el hallazgo de la molécula de benzeno (1865). Jons Jakob Berzelius (1779-1848), fue uno de los fundadores de la química moderna ya que estableció las bases de la estequiometría. Marcelin Pierre Eugene Berthelot (1827-1907), contribuyó a la química con la síntesis de varios compuestos orgánicos. Louis Pasteur (1822-1895), fue conocido por descubrir la acción transmisora y el campo de acción de microorganismos. En 1864 fue invitado por la Academia de Bellas Artes de Paris para ministrar un curso sobre química y física aplicada al arte.

Con distintos grados de transcendencia, los científicos nombrados cooperaron con sus investigaciones al conocimiento de los objetos antiguos por medio del análisis de su composición química.

2) E.R. Caley, "The early history of chemistry in the service of archaeology", *J. of Chemical Education* N° 28, 1951, pp. 64-66.

3) G. Harbottle, "Chemical characterization in archaeology", J.E. Ericson, and T.K. Earle, editores, *Contexts for prehistoric exchange*, Academic Press, New York, 1982, pp. 13-51.

Es importante resaltar que todos ellos incluyeron el análisis químico en objetos arqueológicos como parte de su proceso de descubrimiento.

A partir del siglo XX surge el interés de abordar en forma interdisciplinaria el estudio de los objetos arqueológicos, para lo cual se involucran historiadores del arte, curadores, físicos y químicos. Uno de los grandes incentivadores de esta propuesta fue Edward W. Forbes (1873-1969), quien creó en 1928 el *Department for Conservation and Technical Research en el Fogg Art Museum* en la Universidad de Harvard, que a partir de 1994 toma el nombre de *Straus Center for Conservation and Technical Studies*. Los trabajos realizados en dicha institución son pioneros en la aplicación de sofisticados métodos de análisis en diferentes tipos de objetos de arte e históricos; estudiando cuestiones relacionadas a la procedencia de las producciones artísticas. Sobre la base de esta iniciativa se editó en 1932, la revista *Technical Studies in the Field of Fine Arts*⁴.

Fue a partir de 1958, con el surgimiento del periódico científico, *Archaeometry* en la Universidad de Oxford, que se inicia el gran salto de la interdisciplinaridad entre química, física, matemática y estadística y arqueología. A partir de ahí surge la palabra arqueometría. La revista *Archaeometry* nace como un boletín del *Research Laboratory for Archaeology and the History of Art – RLAHA*, de la Universidad de Oxford, Londres, cuyos fundadores fueron Christopher Hawkes y lord Cherwell, bajo la supervisión de E.T. Hall. De inicio, el periódico no planteó la posibilidad de transformarse en un medio de gran circulación. Su finalidad era ofrecer medios rápidos para circular los resultados de las investigaciones concluidas, difundir los proyectos, parcialmente bien desarrollados que, normalmente, no se publicaban en otras revistas. Además de presentar los informes parciales de algunos de los trabajos en curso. Este periódico se edita hasta los días actuales.

El primer fascículo de *Archaeometry* tenía cinco artículos: dos sobre el análisis químico de monedas griegas; uno describía la aplicación del método de análisis por activación con neutrones en piezas y monedas antiguas de la isla de Samos. Otro sugería el uso de medidas direccionadas utilizando el campo magnético de la tierra como una técnica de datación para artefactos chinos de Yueh (Yue), y otro sobre el uso de la prospección magnética como una técnica de localización de hornos Romano Británicos en el villorrio de Water Newton⁵.

4) E. Bewer, "Early history of conservation and technical Studies at the Fogg Art Museum", <http://cool.conservation-us.org/byform/mailling-lists/cdl/1998/1145.html>, 05 abril 2010.

5) A.M. Pollard, "Archaeometry 50th anniversary issue editorial". *Archaeometry* N° 50(2), 2008, pp. 191-198, DOI 10.1111/j.1475-4754.2008.00395.

A pesar de las metas relativamente modestas del boletín, ese pequeño volumen tenía dos artículos, particularmente significativos para la arqueología: la presentación de los resultados del primer examen geomagnético arqueológico de la Tierra – la prospección magnética con el magnetómetro de protones⁶ y el segundo trabajo sobre análisis de material arqueológico por medio del método de análisis por activación con neutrones⁷.

De esta forma, el término Arqueometría es usado como indicativo de una nueva rama científica, surge con la sistematización de una área interdisciplinar de estudios que une las ciencias exactas a la conservación, restauración y estudio del patrimonio cultural de la humanidad.

Desde la década de los años 50, uno de los principales focos de la Arqueometría ha sido el estudio de cerámicas que, por ser uno de los materiales más producidos por los grupos antiguos, desde el período Neolítico, y por la resistencia a las variaciones climáticas, son encontradas en cantidades significativas en la mayoría de los sitios estudiados, por eso se tornaron el foco principal de estudio de esas comunidades. El principal propósito de caracterizar cerámicas es reconstruir su ciclo de vida, desde su producción (identificando los centros de fabricación, las fuentes de materias primas, el tratamiento superficial, el proceso de cocción, entre otros) hasta el uso final. Los análisis permiten, por lo tanto, correlacionar el ciclo de vida al comportamiento de los grupos involucrados en el proceso, a fin de intentar reconstruir su comportamiento dentro del contexto arqueológico en el que las cerámicas fueron producidas, distribuidas y utilizadas⁸.

Durante la segunda mitad del siglo XX, se observa el esfuerzo de algunos científicos para que los estudios arqueométricos se evidencien como soporte a los análisis arqueológicos. Sin embargo, ese hecho no se asimiló ya que hasta la década de los años 70, la aplicación de esa metodología interdisciplinar no se difundió plenamente entre las instituciones universitarias y los museos.

La última fase de gran relevancia en estudios arqueométricos se da en la segunda mitad de la década del 70 y se relaciona con el desarrollo de mejores instrumentos analíticos que presentan mayor sensibilidad, precisión y exactitud, además de la posibilidad del uso de datos procesados en computador⁹. Esos aspectos, actualmente, son indispensables en estudios científicos.

6) M.J. Aitken, "Magnetic prospecting. I-The water Newton survey", *Archaeometry* N° 1, 1958, pp. 24-26.

7) V.M. Emeleus, "The technique of neutron activation analysis as applied to trace element determination in pottery and coins", *Archaeometry* N° 1, 1958, pp. 6-15.

8) E. Gliozzo, I.M. Turbanti, "Black gloss pottery: production sites and technology in Northern Etruria, Part I: provenance studies", *Archaeometry* N° 46(2), 2004, pp. 201-225.

9) G. Harbottle, "Chemical characterization in archaeology"

Como se puede verificar, la aplicación de métodos científicos como herramientas analíticas para el estudio de los artefactos arqueológicos se intensificó, a partir del siglo XIX, y se extendió en los siglos XX y XXI, constituyéndose como un nuevo tipo de evaluación de los artefactos arqueológicos que toma en consideración métodos interdisciplinares que envuelven el empleo de las ciencias exactas y humanas. Este abordaje favorece inmensamente los estudios en las áreas de arqueometría e historia del arte¹⁰. Como resultado de esta interdisciplinaridad, actualmente, es intenso el uso de técnicas de caracterización físico-química en estudios de vestigios arqueológicos.

El estudio de artefactos arqueológicos, como fragmentos cerámicos, es extremadamente importante en arqueología porque determina el proceso de reconstrucción de la prehistoria humana, especialmente para el establecimiento de las relaciones sociales y culturales entre las comunidades¹¹. Por ser durables, consecuentemente, resistentes a las variaciones climáticas, esos objetos son los más encontrados y estudiados¹².

Las cerámicas, desde el punto de vista geológico, se forman a partir de rocas sedimentares, cuyo principal componente es la arcilla, es decir, aluminio silicatos de composición indefinida. Los principales componentes de la arcilla son Al_2O_3 e SiO_2 , que se encuentran presentes en cantidades mayores al 10%. Impurezas menores, tales como los óxidos de Na, Mg, K, Ca, Ti e Fe se encuentran en concentraciones que varían de 0,1 a 5%. Entretanto, los elementos traza (menores que 0,1%) en la arcilla es “accidental”, y son los que, normalmente, proporcionan la mejor información en estudios arqueométricos. Esta característica torna, estadísticamente, improbable que la concentración de varios elementos traza en la arcilla de una determinada localidad coincida, cuantitativamente, con la de arcilla de otras localidades¹³. Siendo así, las propiedades microscópicas de la cerámica, como la composición química y mineralógica, son capaces de revelar informaciones seguras al respecto de las comunidades antiguas. Este es uno de los principales motivos por los cuales los investigadores hacen uso de técnicas sofisticadas para caracterizar cerámicas¹⁴.

10) M.W. Ainsworth, “From connoisseurship to technical art history – the evolution of the interdisciplinary study of art”, *The Getty Conservation Institute Newsletter*, 20(1), 2005, pp. 4-10.

11) E. Gliozzo, P. Vivacqua, I.T. Memmi, “Integrating archaeology, archaeometry and geology: local production technology and imports at Paola (Cosenza, Southern Italy)”, *J. of Archaeological Science* N° 35(4), 2008, pp. 1074-1089.

12) Casimiro Munita, R.P. Paiva, M.A. Alves, Paulo M.S. Oliveira, E.F. Momose, “Contribution of neutron activation analysis to archaeological studies”, *J. of Trace and Microprobe Techniques*, N° 18(3), 2000, pp. 381-387.

13) Michael D. Glascock, “Characterization of ceramics at MURR by INAA and multivariate statistics”, Chemical characterization of ceramic paste in archaeology, *Monographs in World Archaeology*, H.Neff editor, Prehistory Press, Section 1, 1992, pp. 11-26.

14) T.J. Scarlett, R.J. Speakman, Michel D. Glascock, “Pottery in the mormon economy: an historical, archaeological and archaeometric study”, *Historical Archaeology* N° 41, 2007, pp. 72-97.

En las últimas décadas, hubo un aumento significativo de los estudios con cerámicas lo que permitió comprender factores como: tecnología y producción cerámica,¹⁵ uso de los artefactos manufacturados,¹⁶ así como, su intercambio cultural y/o comercial, entre otros fenómenos sociales. Una de las maneras de identificar y clasificar esas cerámicas es por medio del análisis de los perfiles estratigráficos y de técnicas tipológicas (estudios de decoración, color, forma, textura, etc.). Entretanto, estas variables, asociadas a los resultados de las técnicas arqueométricas, presentan un conjunto mayor de informaciones para los estudios de procedencia; así como, para la investigación sobre la producción de estos artefactos cerámicos¹⁷. De modo general, los principales aspectos estudiados en arqueometría son: composición química, técnicas de producción y cronologías de los vestigios rescatados. Lo que confirma que la interdisciplinariedad entre las ciencias exactas y humanas favorece la obtención de resultados efectivos.

Para los estudios de proveniencia, el análisis de la composición química del material cerámico es un parámetro analítico de extrema importancia, ya que las pequeñas diferencias en las concentraciones de los elementos en las muestras, distinguen las cerámicas. Entre las diversas técnicas para la determinación de elementos traza, el método de análisis por activación con neutrones asociado con la espectrometría de rayos gama de alta resolución, se usa preferentemente para determinar la composición química en las muestras porque presenta varias ventajas, como alta sensibilidad, precisión y exactitud¹⁸. Además de usar en el análisis una masa muy pequeña de muestra, lo que es extremadamente conveniente tratándose de material arqueológico.

Como consecuencia de la gran cantidad de muestras que necesitan ser analizadas y al número de variables determinadas (elementos), el análisis estadístico multivariado se torna indispensable para la interpretación de los resultados. La aplicación de métodos estadísticos en resultados experimentales

-
- 15) Cfr. D.E. Arnold, "Does the standardization of ceramic pastes really mean specialization?", *J. of Archaeological Method and Theory* N° 7(4), 2000, pp. 333-375 y M. He Hegmon, "Advances in ceramic ethnoarchaeology", *J. of Archaeological Methods and Theory* N° 7(3), 2000, pp. 129-137.
- 16) Cfr. I.C. Druc. "Ceramic production in San Marcos Actoplan, Puebla, México", *Ancient Mesoamerica*, 11, 2000, pp. 77-89 y Michael D. Glascock, H. Neff, "Neutron activation analysis and provenance research in archaeology", *Measurement Science & Technology* N° 14(9), 2003, pp. 1516-1526.
- 17) Y. Lei, S.L. Feng, Q. Feng, Z.F. Chai, "A provenance study of Tang Sancai from Chinese tombs and relics by INAA", *Archaeometry* N° 49(3), 2007, pp. 483-494.
- 18) Cfr. J.O. Santos, Casimiro. Munita, R.G. Toyota, "The archaeometry study of the chemical and mineral composition of pottery from Brazil's Northeast", *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* N° 281, 2009, pp.189-192 y R.L. Bishop, M.J. Blackman, "Instrumental neutron activation analysis of archaeological ceramics: scale and interpretation", *Accounts of Chemical Research* N° 35, 2002, pp. 603-610.

permite la clasificación y la ordenación de los objetos relacionados entre sí en función de su composición química. Para ese fin, se han usado diversos métodos de análisis, tales como: de agrupamiento, discriminante, de componentes principales, por medio de redes neurales, entre otros¹⁹.

Elementos químicos

Con el propósito de conocer el origen o la fuente de la materia prima que se usó en la fabricación de una cerámica, es necesario entender algunos conceptos de química y geología. La química es importante porque es una herramienta que ayuda a entender e interpretar las propiedades de la cerámica que no aparecen a simple vista. Es una herramienta que ofrece muchas informaciones al arqueólogo. Existen dos aspectos a ser considerados en este tipo de estudios: la identificación cualitativa y cuantitativa de los elementos y las especies químicas en la muestra y el agrupamiento de las especies o elementos químicos encontrados. Esa relación puede ser explicada en el contexto de la geología como se debate a continuación²⁰.

La formación de los elementos químicos es considerada desde el punto de vista de que toda la materia que conocemos en la Tierra y en otras estrellas, tuvo su origen en las galaxias.

Las evidencias indican que el hidrógeno y el helio se formaron durante la fase inicial de la evolución del universo, en cuanto que los elementos más pesados fueron sintetizados por medio de reacciones termonucleares ocurridas en las estrellas.

De acuerdo con las teorías cosmológicas, es decir, del estudio del origen y de la estructura del universo, los elementos químicos se originaron por medio de reacciones termonucleares en el interior de las estrellas. Siendo dos elementos los que predominaron inicialmente: el hidrógeno y el helio. En una estrella como el Sol, a cada segundo 655 millones de toneladas de hidrógeno son transformadas en 650 millones de toneladas de helio y 5 millones de toneladas de energía por medio de la fusión termonuclear. A partir de ese proceso son producidos los elementos más pesados. Los procesos de núcleo síntesis necesitan temperaturas de muchos millones de grados y solamente ocurren durante la evolución estelar. Sin embargo, cuando una estrella maciza consume su combustible nuclear, ésta puede explotar como una supernova, esparciendo en el espacio los elementos producidos en su evolución.

19) R.G. Toyota, Casimiro Munita, E.G. Neves, C.C. Demartini, "Estudo preliminar do efeito do tempero na cerâmica Marajoara", *Canindé* N° 11, 2008, pp. 55-64.

20) C.B. Mason, C.B. Moore, *Principles of geochemistry*, 4th edition, New York, John Wiley and Sons, 1982, pp. 344.

El origen de los elementos nos lleva a pensar al respecto de la abundancia cósmica de los elementos. Fue V.M. Goldschmidt, en 1937, que por la primera vez hizo estimaciones de la abundancia cósmica, basándose en los datos de espectro solar y estelar y en la composición de los meteoritos.

En general, los elementos más livianos son más abundantes porque dependen de la estabilidad nuclear de cada uno de ellos. Por otro lado, los elementos de números atómicos pares son más abundantes que los de números impares vecinos. Los números atómicos pares resultan de números pares de protones y neutrones teniendo como consecuencia una mayor estabilidad. Por otra parte, la abundancia de los elementos disminuye con la creciente complejidad de los núcleos. Eso explica la ausencia en la Tierra de los elementos con números atómicos 43 (Tc), 61 (Pm), 85 (At), e 87 (Fr) que se caracterizan por la casi completa inestabilidad de cualquier estructura nuclear.

Un 99% de la corteza terrestre consta de ocho elementos: oxígeno 45,6%, silicio 27,3%, aluminio 8,36%, hierro 6,2%, calcio 4,6%, sodio 2,27%, potasio 1,84% y magnesio 2,7%. Por lo tanto, la corteza está formada por compuestos de oxígeno, silicio y aluminio que forman parte de los minerales más comunes, que se encuentran en la forma de óxidos como SiO_2 , Fe_3O_4 , KAlSi_3O_8 , $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, MgSiO_3 , Mg_2SiO_4 , Fe_2SiO_4 , $\text{Mg}_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$, $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$, $\text{KMg}_3\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$.

La composición media de la corteza es, esencialmente, igual a las rocas ígneas (rocas formadas a elevadas temperaturas) porque son las que predominan en un 65% en la corteza, rocas sedimentares (derivadas de sedimentos) y metamórficas.

Las rocas y los minerales tienen composición química que no cambia, pero la proporción de los compuestos o los elementos químicos en las rocas puede cambiar. Por ejemplo, si por análisis químico se determinan las cantidades exactas de Mg y Fe que están presentes en la proporción de $(\text{Mg}_{0,3}\text{Fe}_{0,7})_2\text{SiO}_4$, en este caso, 30% de los lugares del catión en la estructura cristalina están siendo ocupados por Mg y 70% por Fe. Por lo tanto, los elementos mayores dan una idea del tipo de mineral del cual fue hecha la cerámica. Si existe más aluminio que silicio, la cerámica fue fabricada a partir de un mineral que presenta una concentración mayor en ese elemento. Dos a 4% de K (en la forma de óxido) indica la presencia de minerales de mica en gran abundancia. Entonces, existe una forma que puede ser usada para los elementos mayores y ellos expresan el mineral que fue usado en la fabricación de la cerámica.

Los elementos menores indicarán la variación que ocurre de una fuente de materia prima a otra. Por ejemplo, en una cerámica de una misma región, si la concentración de Fe es dos veces mayor que la otra, la fuente de la materia prima (arcilla, agentes colorantes, aditivos) o el método de producción son diferentes. La concentración de los elementos menores puede dar información sobre diferencia

entre grupos. Con frecuencia, los elementos menores son diferentes conforme la fuente geológica.

Los elementos traza son mucho más difíciles de interpretar. Si el elemento traza está presente en una concentración mayor que en los minerales de los cuales fue producida la cerámica, ese elemento traza puede ser usado para determinar la proveniencia del mineral en la pasta o distinguir diferentes grupos cerámicos.

En algunos casos los elementos traza forman parte de la roca, entretanto, en la mayoría de las veces, sustituyen los elementos mayores en el retículo cristalino. La importancia de los elementos traza radica en el hecho que son capaces de discriminar entre procesos petrológicos. Por lo tanto, el estudio de los elementos traza es fundamental en investigaciones de petrología porque son capaces de diferenciar esos procesos.

Las reglas que rigen la sustitución en el retículo cristalino son:

1. Si dos iones tienen el mismo tamaño (radio iónico) y la misma carga, ellos entrarán en el retículo cristalino con igual facilidad;
2. si dos iones tienen radios iónicos similares y la misma carga, el ion menor entrará más fácilmente en el retículo cristalino que el ion con radio iónico mayor. Es lo que ocurre, por ejemplo, en los minerales ferro-magnesianos en relación al Mg^{2+} (radio iónico de $0,66 \text{ \AA}$) y al Fe^{2+} (radio iónico de $0,74 \text{ \AA}$);
3. si dos iones tienen radios iónicos similares y cargas diferentes, el ion con carga mayor entrará con mayor facilidad en el retículo cristalino. Por ejemplo, Ca^{2+} (radio iónico de $0,99 \text{ \AA}$) e Na^+ (radio iónico de $0,97 \text{ \AA}$) en los plagioclasas.

Esas reglas se basan en el supuesto de que los enlaces entre los elementos son iónicos, entretanto, en la mayoría de los minerales no son exclusivamente iónicos, pueden ser covalentes. La electronegatividad de un elemento también influye en la sustitución de un elemento de radio iónico menor por otro con radio iónico parecido. Cuando esa sustitución ocurre, el elemento de menor electronegatividad tendrá preferencia porque forman enlaces iónicos más fuertes. El potencial iónico que es la razón entre la carga del ion y el radio iónico es una medida de la electronegatividad, porque tanto menor es el radio de un ion con carga positiva y tanto mayor su carga, tanto más ácido es su óxido. Por otra parte, cuanto mayor es el radio y tanto más baja la carga, tanto más básico es el óxido. Por lo tanto, el comportamiento de los cationes depende del radio iónico, del estado de oxidación (valencia) y del tipo de enlace.

El potencial iónico determina el comportamiento de los iones en su interacción con el medio. Los elementos con bajas razones son solubles y permanecen en solución durante el proceso de intemperismo y transporte. Los elementos con potencial iónico intermedio son precipitados por hidrólisis, en cuanto que los de potencial iónico alto forman complejos solubles. Por ejemplo, Mn^{2+} con potencial iónico de 2,5 es estable en solución, entretanto Mn^{4+} con potencial iónico 6,7 es precipitado en forma hidratada. El hierro en la forma de ion ferroso (Fe^{2+}) con potencial iónico 2,7 es estable en solución y en la forma de ion férrico (Fe^{3+}) con potencial de ionización 4,7 es precipitado en forma hidratada. Por tanto, el potencial iónico de un elemento muestra su movilidad en el medio, lo que va a influir en la concentración en la arcilla y por consiguiente en la cerámica. Los elementos con potencial iónico menor que 2 como Cs, Sr, K, Rb, y Ba son aquellos que se desplazan en los minerales.

Por otra parte, los elementos con potencial iónico mayor que 2 como las tierras raras, también llamadas de elementos lantánidos, que corresponden a los elementos con número atómico que va desde el 51 al 71 (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu), además de Y, Sc, Th, U, Pb, Zr, Hf, Ti, Nb, Ta, U, Co, Ni, V y Cr son elementos inmóviles. Por lo tanto, son los elementos que necesitan ser determinados en las muestras de cerámicas y arcilla porque pueden dar información de la materia prima usada en la fabricación de las piezas así como de la composición química de los minerales.

El comportamiento químico de los elementos traza en la cerámicas son estudiados en grupos y los elementos que tienen comportamiento diferente dentro del grupo, son usados como indicador de procesos petrológicos. Los elementos traza también son clasificados de acuerdo a su posición en la Tabla periódica.

Por último, se puede concluir, como ya vislumbraban científicos que hicieron grandes contribuciones a la ciencia y a la humanidad, que la participación de la química es primordial para la arqueología y tiene aplicación directa tanto en la caracterización de los objetos, como también en la conservación y restauración. Muchos de los problemas asociados a los métodos de fabricación y preservación se basan en los resultados analíticos. Los resultados analíticos facilitan el estudio de la historia de las diferentes regiones e infieren el nivel socio-cultural y tecnológico de esas comunidades. Esta información analítica requiere de una interpretación en conjunto con el arqueólogo.

Bibliografía

- Ainsworth, M.W., "From connoisseurship to technical art history – the evolution of the interdisciplinary study of art", *The Getty Conservation Institute Newsletter* Nº 20(1), 2005, pp. 4-10.
- Aitken, M.J., "Magnetic prospecting. I- The water Newton survey", *Archaeometry* Nº 1, 1958, pp. 24-26.
- Arnold, D.E., "Does the standardization of ceramic pastes really mean specialization?", *J. of Archaeological Method and Theory* Nº 7(4), 2000, pp. 333-375
- Bewer, F., "Early history of conservation and technical Studies at the Fogg Art Museum", <http://cool.conservation-us.org/byform/mailling-lists/cdl/1998/1145.html>.
- Bishop, R.L., Blackman, M.J., "Instrumental neutron activation analysis of archaeological ceramics: scale and interpretation", *Accounts of Chemical Research* Nº 35, 2002, pp. 603-610.
- Caley, E.R., "Klaproth as a Pioneer in the chemical investigation of antiquities", *J. of Chemical Education* Nº 26, 1949, pp. 242-247; 268.
- Caley, E.R., "The early history of chemistry in the service of archaeology", *J. of Chemical Education* Nº 28, 1951, pp. 64-66.
- Druc. I.C., "Ceramic production in San Marcos Actoplan, Puebla, México", *Ancient Mesoamerica* Nº 11, 2000, pp. 77-89 y M.D. Glascock, H. Neff, "Neutron activation analysis and provenance research in archaeology", *Measurement Science & Technology* Nº 14(9), 2003, pp. 1516-1526.
- Emeleus, V.M., "The technique of neutron activation analysis as applied to trace element determination in pottery and coins", *Archaeometry* Nº 1, 1958, pp. 6-15.
- Glascock, Michael D. "Characterization of ceramics at MURR by INAA and multivariate statistics", Chemical characterization of ceramic paste in archaeology, *Monographs in World Archaeology*, H.Neff editor, Prehistory Press, Section I, 1992, pp. 11-26.
- Glascock, Michael D., Neff, H., "Neutron activation analysis and provenance research in archaeology", *Measurement Science & Technology* Nº 14(9), 2003, pp. 1516-1526.
- Gliozzo, E., Turbanti, I.M., "Black gloss pottery: production sites and technology in Northern Etruria, Part I: provenance studies", *Archaeometry* Nº 46(2), 2004, pp. 201-225.
- Gliozzo, E., Vivacqua, P., Memmi, I.T., "Integrating archaeology, archaeometry and geology: local production technology and imports at Paola (Cosenza, Southern Italy)", *J. of Archaeological Science* Nº 35(4), 2008, pp. 1074-1089.
- Harbottle, G., "Chemical characterization in archaeology", J.E. Ericson, and K. Earle, editores, *Contexts for prehistoric exchange*, Academic Press, New York, 1982, pp. 13-51.
- He Hegmon, M., "Advances in ceramic ethnoarchaeology", *J. of Archaeological Methods and Theory* Nº 7(3), 2000, pp. 129-137.
- Lei, Y., Feng, S.L., Feng Q., Chai, Z.E., "A provenance study of Tang Sancai from Chinese tombs and relics by INAA", *Archaeometry* Nº 49(3), 2007, pp. 483-494.
- Mason, C.B., Moore, C.B., *Principles of geochemistry*, 4th edition, New York, John Wiley and Sons, 1982, pp. 344.
- Munita, Casimiro, Paiva, R.P., Alves, M.A., Oliveira, Paulo M.S., Momose, E.E., "Contribution of neutron activation analysis to archaeological studies", *J. of Trace and Microprobe Techniques* Nº 18(3), 2000, pp. 381-387.
- Pollard, A.M., "Archaeometry 50th anniversary issue editorial". *Archaeometry*, 50(2), 2008, pp. 191-198, DOI 10.1111/j.1475-4754.2008.00395.
- M.J. Aitken, "Magnetic prospecting. I-The water Newton survey", *Archaeometry* Nº 1, 1958, pp. 24-26.
- Santos, J.O., Munita, Casimiro. Toyota, R.G., "The archaeometry study of the chemical and mineral composition of pottery from Brazil´s Northeast", *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* Nº 281, 2009, pp.189-192.
- Scarlett, T.J., Speakman, R.J., Glascock, Michael D., "Pottery in the mormon economy: an historical, archaeological and archaeometric study", *Historical Archaeology* Nº 41, 2007, pp. 72-97.
- Toyota, R.G., Munita, Casimiro, Neves, E.G., Demartini, C.C., "Estudo preliminar do efeito do tempero na cerâmica Marajoara", *Canindé* Nº 11, 2008, pp. 55-64