

# ANÁLISIS DE PIEZAS ARQUEOLÓGICAS CON TÉCNICAS NUCLEARES

*D. Tenorio*

<sup>1</sup>ININ, km 36.5 Carr. Mexico-Toluca, 52045 México, [dtc@nuclear.inin.mx](mailto:dtc@nuclear.inin.mx)

## 1. INTRODUCCIÓN

Las primeras aplicaciones de las técnicas nucleares en el análisis de piezas arqueológicas, data a partir de los años cincuenta. Así en el año de 1956 el Dr. J. Robert Oppenheimer en U. S.A. y el Dr. Dodsom se propusieron investigar, sobre las potenciales aplicaciones de la técnica análisis por activación neutrónica en piezas arqueológicas. Para llevar a cabo esta técnica se requiere de un reactor nuclear, que podríamos considerarlo en este caso como una fabrica de neutrones térmicos; estas partículas son las necesaria para llevar a cabo un análisis por activación neutrónica<sup>(1)</sup>.

El análisis por activación neutrónica es una técnica multielemental muy exacta y versátil, que se basa en as diferentes partículas de cada núcleo, que se basa en las diferentes partículas de cada núcleo atómico. Durante la irradiación de un material con neutrones térmicos en un reactor nuclear. Los átomos antes estables, dan como resultado isótopos radiactivos capaces de emitir radiación gamma, para convertirse en átomos estables o aún inestables. Posteriormente se llevan a cabo la medición con un espectrometro gamma. Sí se compara con un material de composición química conocida (patrón), es posible llevar a cabo un análisis cuantitativo de los elementos que integran la muestra Con esta técnica se puede determinar hasta partes por millón.

Los primeros experimentos que llevaron a cabo en la aplicación de NAA fue en el análisis de cerámicas provenientes del Mediterráneo en las que se determinaron las relaciones de los elementos de sodio y manganeso<sup>(1)</sup>.

En México en los años noventa se inició de una manera formal un proyecto de investigación, sobre la aplicación de técnicas nucleares aplicadas a la caracterización de muestras arqueológicas. Para llevar a cabo este proyecto se invito a investigadores de diferentes instituciones como el INAH, UNAM y se incorporaron jóvenes arqueólogos egresados de la Escuela Nacional de Antropología e Historia.

Para poder aplicar el análisis por activación neutrónica en la caracterización de piezas arqueológicas, es necesario contar con un reactor nuclear, que podríamos considerarlo para fines prácticos como una fabrica de neutrones.

México cuenta con una reactor nuclear del tipo TRIGA MARK III, que fue adquirido por el Centro Nuclear "Dr. Nabor Carrillo" en los años sesenta. Este es un reactor para investigación tipo piscina, fabricado por la General Atomic co., y utiliza como combustible uranio-235 enriquecido al 20 %, homogéneamente combinado con hidruro de uranio, que sirve de moderador figura 1.



*Figura 1 Reactor Nuclear Triga Mark III del Centro Nuclear "Dr. Nabor Carrillo Flores".*

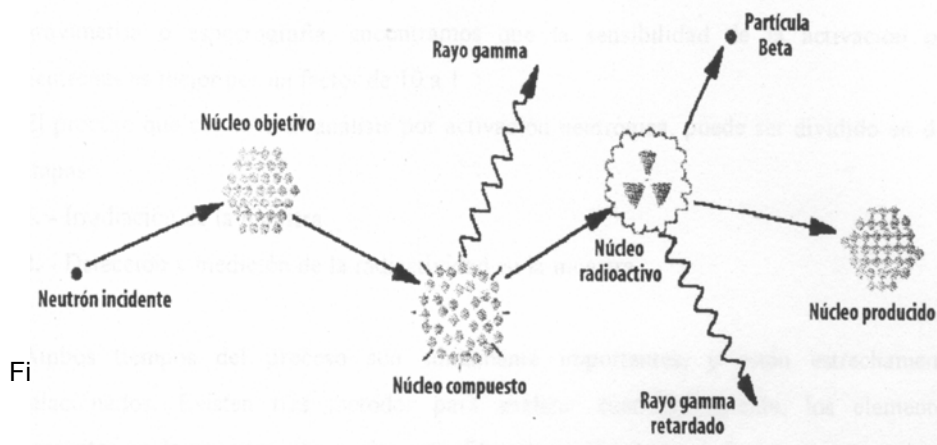
El análisis por activación neutrónica, se basa en la detección de especies radiactivas producidas en un muestra, cuando ésta se pone en contacto con neutrones térmicos. Los neutrones térmicos son partículas que no poseen carga y tienen una energía de 14 mega electrón volts.

Así cuando una muestra es bombardeada con neutrones, una gran variedad de reacciones nucleares se lleven a cabo. Los neutrones térmicos interactúan con los núcleos de los elementos presentes, dando lugar a reacciones nucleares ( $n,\gamma$ ). La mayor parte de los isótopos estables pueden capturar neutrones térmicos, la capacidad de que un núcleo capture un neutrón, es lo que se denomina sección eficaz. El núcleo al capturar el neutrón se convierte en un núcleo excitado, una de las maneras de perder esa energía, es mediante la emisión de radiación gamma. **La figura 2** ilustra de una manera esquemática la captura de un neutrón, por el núcleo de un elemento y para alcanzar su estado base emite radiación gamma, partícula beta o alfa y al final se produce otro núcleo.

La detección e identificación de la energía de esta radiación gamma es la forma de identificar al elemento radiactivo y además de utilizar un parámetro adicional que es la "vida media", valor característico de cada radioisótopo. Este termino de vida media se define como el tiempo transcurrido, para que una actividad  $A_0$  del radioelemento se reduzca a la mitad  $A_0/2$ . Los valores de vida media varían desde microsegundos hasta miles de años.

Una de las inquietudes mas frecuentes de los arqueólogos es la procedencia o fuente del material, que ellos encuentran en las excavaciones, donde se obtuvo la materia prima para hacer el artefacto?. Los artefactos hechos a base de obsidiana se encuentran con frecuencia en las excavaciones arqueológicas.

Los artefactos de obsidiana son el tipo de objetos que mejor se adecua, para la reconstrucción de patrones de intercambio. Una de las principales características de las obsidianas es que al percutirla o tallarla la composición y sus propiedades químicas no se alteran.



Fi

Figura 2 Diagrama de la captura de un neutrón por un núcleo, seguido de la emisión de radiación gamma.

Cabe resaltar que la obsidiana fue uno de los materiales mas utilizados en la época prehispanica, hay algunos autores que compararan la importancia de este material con la del petróleo y del acero en la época actual.

La obsidiana es una roca magmática, que se produce en la actividad volcánica y en los flujos de lava emanados de esta. La obsidiana se forma por el rápido enfriamiento de la lava. La obsidiana es un complejo de silicatos de aluminio además de estar formada por otros elementos como son: sodio, potasio, calcio y hierro. Otros elementos que se encuentran presentes en unas concentraciones menores de 0.2% son: titanio y manganeso. Otra serie de elementos que se encuentran en concentraciones de partes por millón (ppm) son: rubidio, cesio, bario, torio, uranio, iterbio, europio, lutecio disprosio, lantano. La concentración de estos elementos depende del yacimiento del cual provenga la obsidiana.

Una de las técnicas mas socorridas para la caracterización elemental de las obsidianas es la de análisis por activación neutrónica. La cantidad de muestra que se requiere, para una análisis de esta tipo es de dos gramos.

La figura 3 ilustra los pasos a seguir para llevar a cabo un análisis por activación neutrónica.

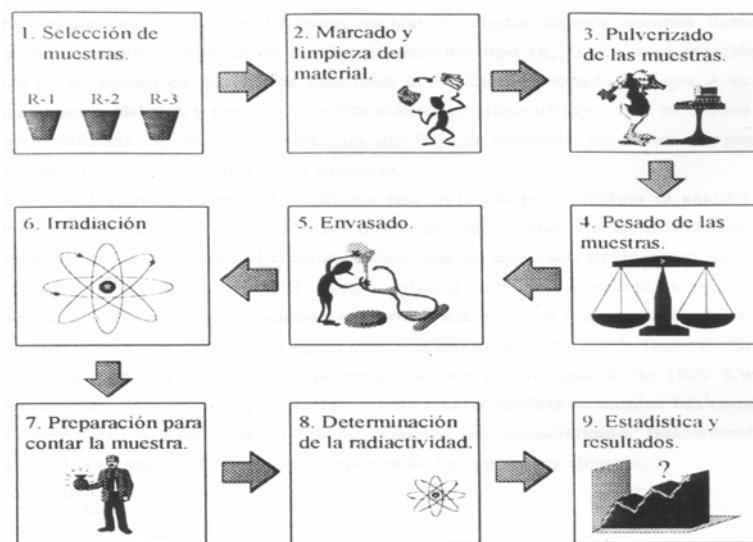
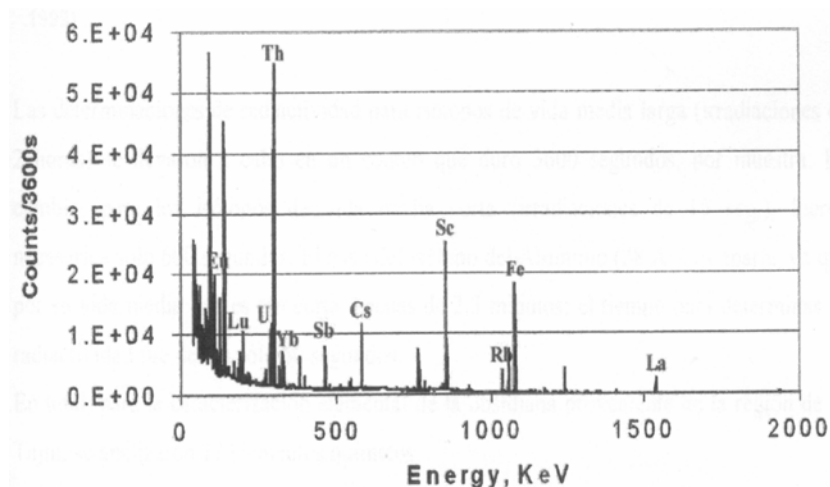


Figura 3 . Diagrama de flujo para el análisis por activación neutrónica, de muestras de obsidiana. (Dibujo, J. R. Esparza Tesis ENAH 1999).

Una vez irradiada la muestra se detecta la radiactividad con un detector de germanio hiperpuro y se obtiene un espectro como se ilustra en la figura 4.

Para llevar a cabo el análisis cuantitativo se utiliza el método de comparación. Este consiste en irradiar un patrón con elementos de concentración conocida, conjuntamente con la muestra que se quiere analizar. Detectando la radiación gamma que emite tanto el patrón como la muestra problema, en las mismas condiciones geométricas. De esta forma los únicos parámetros a controlar para los cálculos serán : los valores de la sección eficaz, el flujo de neutrones y el tiempo de conteo. En nuestro caso usamos como patrón el "278 obsdian Rock" de Standart Reference Meterial. La **tabla 1** muestra las propiedades nucleares de los isótopos que caracterizamos en el caso muy específico de obsidianas (E. Browne 1978) .



*Figura 4 Espectro de radiación gamma tipo de una obsidiana, irradiada con neutrones térmicos durante 2 horas en un reactor nuclear.*

Un gran numero de investigaciones sobre la obsidiana en Mesoamérica han sido llevado a cabo, a continuación se describen algunos trabajos importantes.

Glascok et al (1988) publicaron investigaciones sobre la caracterización con NAA de yacimientos de obsidianas del Estado de Hidalgo, para determinar la fuente de procedencia de artefactos del sitio arqueológico de Tula Hidalgo.

Los yacimientos analizados son El Chapulín, El Encinal, Cerro de Ixtete, Santa Elena, Malpais, Totolapa, Tepalzingo, Metzquititlan, Rancho Tenango, Sierra de Pachuca, El Pizarrin, Zacualtipan. Los 47 artefactos de obsidiana que fueron analizados, provienen de una excavación que se hizo en Tula Edo. de Hidalgo.

Isotopo Natural	Abundancia (%)	Sección (b)	Eficaz	Isotopo formado	Vida Media	Gamma espectro (KeV)
<sup>23</sup> Na	100	0.53		<sup>24</sup> Na	15 h	1369, ...
<sup>27</sup> Al	100	0.24		<sup>28</sup> Al	2.3 m	1780
<sup>37</sup> Cl	24.5	0.4		<sup>38</sup> Cl	37 m	1600, ...
<sup>41</sup> K	6.8	1.2		<sup>42</sup> K	12.4 h	1524, ...
<sup>45</sup> Sc	100	13		<sup>46</sup> Sc	84 d	889, 1120
<sup>55</sup> Mn	100	13.3		<sup>56</sup> Mn	2.5 h	847, 1811, ...
<sup>58</sup> Fe	0.31	1.1		<sup>59</sup> Fe	45.6 d	1095, 1292, ...
<sup>85</sup> Rb	72.15	0.9		<sup>86m</sup> Rb	1 m	-
		0.1		<sup>86</sup> Rb	18.7 d	1078
<sup>81</sup> Br	49.5	3		<sup>82</sup> Br	35 h	776, 554, 619, 698, 1044, 1317, ...
<sup>121</sup> Sb	57.25	6		<sup>122</sup> Sb	2.8 d	564, ...
<sup>133</sup> Cs	100	28		<sup>134</sup> Cs	2 y	796, 605, 570, ...
<sup>138</sup> Ba	71.7	0.4		<sup>139</sup> Ba	83 m	166, ...
<sup>139</sup> La	99.9	8.9		<sup>140</sup> La	40 h	1.596, 487, 816, 329, ...
<sup>151</sup> Eu	47.8	2800		<sup>152m1</sup> Eu	9.3 h	122, 344, ...
<sup>164</sup> Dy	28.2	800		<sup>165</sup> Dy	139 m	95, 361, ...
<sup>174</sup> Yb	31.8	9		<sup>175</sup> Yb	101 h	396, ...
<sup>176</sup> Lu	2.6	2100		<sup>177</sup> Lu	6.7 d	208, 113
<sup>232</sup> Th	100	7.4		<sup>233</sup> Th	22.1 m	-
				<sup>233</sup> Pa	27 d	310
<sup>238</sup> U	99.276	2.73		<sup>239</sup> U	23.5 m	-
				<sup>239</sup> Np	2.3 d	106, 228, 278, ...

Tabla 1. Datos Nucleares para la identificación de los isotopes. (b : barn =  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup>, m : minuto, h : hora, d : día, y : año)

Los elementos que se determinaron en las obsidias con el método de NAA son: cloro, disprosio, manganeso, potasio, cloro, antimonio, bario, cerio, cesio, cobalto, europio, hafnio, hierro, lantano, lutecio, neodimio, rubidio, escandio, tantalio, terbio, torio, uranio, yterbio, zinc, zirconio, boro, gadolinio y samario.

J. R. Vogt et al (1981) publico un estudio sobre yacimientos de obsidiana en Mesoamérica con la técnica de NAA. En esta investigación se analizaron yacimientos tanto de México, como de Guatemala y Honduras. Los yacimientos analizados son los siguientes:

1. Magdalena, Jalisco	21 Malpais, Hidalgo.
2. Teuchitlan, Jalisco	22. Otumba, Edo. de Hidalgo
3. Tequila, Jalisco	23. Tres Cabezas (Paredón), Puebla.
4. Penjamo, Guanajuato.	24. Oyameles, Puebla.
5. Zinapécuaro, Michoacán.	25. Zaragoza, Puebla.
6. Ucareo, Michoacán.	26. Guadalupe Victoria, Puebla.
7. El Paraíso, Queretaro.	27. Pico de Orizaba, Veracruz.
8. Fuentezuelas, Queretaro	28. Altotonga, Veracruz.
9. Cadereyta de Montes, Queretaro.	29. San Lorenzo, Guatemala.
10. Zacualtipan, Hidalgo.	30. Palo Gordo, Guatemala.
11. Metzquititlan, Hidalgo.	31. Aldea Chatalun, Guatemala.
12. Sierra de Pachuca, Hidalgo	32. San Bartolomé Milpas Altas Guatemala.
13. El Capulín, Hidalgo.	33. El Chayal, Guatemala.
14. Tulancingo, Hidalgo.	34. Jalapa, Guatemala.
15.- Tepalzingo, Hidalgo.	35. Media Cuesta (Lago Ayarza) Guatemala.

16.- Rancho Tenango, hidalgo	36. Ixtepeque Volcano, Guatemala.
17. Totolapa, hidalgo.	37. Lake Yojoa, Honduras.
18. Cerro del Ixtete, Hidalgo.	
19. Santa Elana, Hidalgo.	
20. El Encinal, Hidalgo	

Las obsidias de los yacimientos fueron recolectadas por R. Cobean durante los años de 1969-72 y forman parte de la colección denominada "Yale Collection".

J. M. Elam et al. (1990) analizaron cincuenta artefactos provenientes de Jalieza del Valle de Oaxaca, México, con la técnica de NAA. De acuerdo al estudio estadístico de los resultados obtenidos el origen de estos artefactos es de: Zaragoza Puebla, Pachuca Hidalgo, Pico de orizaba Veracruz, Guadalupe Victoria, Ucareo Michoacán, Otumba.

En esta investigación se determinaron 28 elementos: boro, bario, cerio, cloro, cobalto, cesio, disprosio, europio, hierro, gadolinio, hafnio, potasio, lantano, lutecio, manganeso, sodio, neodimio, rubidio, antimonio, escandio, samario, tantalio, terbio, uranio, iterbio, zinc y zirconio.

Robert H. Cobean et al. (1991) describen el análisis de elementos trazas de yacimientos de obsidiana utilizados en la época prehispánica, y de algunos artefactos procedentes de San Lorenzo Tenochtitlan, México.

Los yacimientos de México analizados con NAA fueron: Pico de Orizaba Veracruz., Guadalupe Victoria Puebla, derrumbadas Puebla, Zaragoza y Oyameles Puebla, Altotonga Veracruz, Sierra de Pachuca Hidalgo, Tulancingo y Rancho Grande Hidalgo, Otumba Estado de México, Zinápecuaro Michoacán, Teuchitlán Jalisco, Tequila Jalisco, Magdalena Jalisco, Penjamo Guanajuato, El pariso y Fuentezuelas Querétaro.

También reportaron el análisis de yacimientos de Guatemala tales como: El Chayal, Ixtepeque, Aldea Chatalún Departamento de Chimaltenango, San Bartolomé Milpas Altas Departamento de Sacatepéquez, Media Cuesta Lago Ayarza Departamento de Santa Rosa, Jalapa Departamento de Jalapa, Poalo Gordo y San Lorenzo San Marcos.

Los elementos que determinaron se clasifican en dos grupos los de vida media corta que son: cloro, disprosio, potasio, manganeso y sodio. Los elementos de vida media larga: bario, cerio, cobalto, cesio, europio, hierro, hafnio, lantano, lutecio, neodimio, rubidio, escandio, antimonio, tantalio, terbio, torio, uranio, yterbio, zinc y zirconio. Además de determinar por gammas rápidas los siguientes elementos: boro, samario y gadolinio.

M. D. Glascock, et al (1994) publicaron una investigación sobre la caracterización de 1200 artefactos de obsidiana con análisis por activación neutrónica. Los elementos que determinaron con esa técnica fueron: lantano, lutecio, neodimio, samario, uranio, iterbio, cerio, cobalto, cesio, europio, hierro, hafnio, rubidio, antimonio, escandio, estroncio, tantalio, terbio, torio, zinc y zirconio.

Los artefactos analizados provienen de diferentes sitios arqueológicos tanto de México como de Guatemala y Honduras. De los sitios de México se tienen: Tula, Teotihuacan, La Mistiquilla, San Lorenzo Tenochtitlan, Valle de Oaxaca y Azcapotzalco. De los sitios arqueológicos de Guatemala se tiene: Barberta. De Honduras se tiene: Cihuatán, Quelepa y La Entrada.

De los artefactos provenientes de los sitios de México, se encontró por los estudios estadísticos de los resultados, que los yacimientos de donde procedía el material de obsidiana fueron: Zaragoza, Sierra de Pachuca, Pico de Orizaba, Otumba, Guadalupe Victoria, Ucareo, Paredón y Zacualtipán.

Glascok et al (1988) publicaron investigaciones sobre la caracterización con NAA de yacimientos de obsidianas del Estado de Hidalgo, para determinar la fuente de procedencia de artefactos del sitio arqueológico de Tula Hidalgo.

Los yacimientos analizados son El Chapulín, El Encinal, Cerro de Ixtete, Santa Elena, Malpais, Totolapa, Tepalzingo, Metzquititlan, Rancho Tenango, Sierra de Pachuca, El Pizarrin, Zacualtipan. Los 47 artefactos de obsidiana que fueron analizados, provienen de una excavación que se hizo en Tula Edo. de Hidalgo.

Los elementos que se determinaron en las obsidianas con el método de NAA son: cloro, disprosio, manganeso, potasio, cloro, antimonio, bario, cerio, cesio, cobalto, europio, hafnio, hierro, lantano, lutecio, neodimio, rubidio, escandio, tantalio, terbio, torio, uranio, yterbio, zinc, zirconio, boro, gadolinio y samario.

Las investigaciones que se han llevado a cabo en México sobre caracterización de obsidianas son las siguientes:

J. R. Esparza (Tesis ENAH 1999), llevó a cabo un trabajo de investigación sobre "Aplicación de las técnicas nucleares PIXE y NAA para el estudio de las redes de comercio de la obsidiana en Tierra Caliente de Michoacán". En esta investigación se analizaron yacimientos del occidente de México como son Zinaparo, Cerro Varal. Se analizaron lascas provenientes de los sitios de Lagunillas, Iglesias, Las Cuevas, La Campana, Los Montones, La Pintada, La Colmilluda, Pinto Cuate, El Huicumo, Los Limones.

Los elementos que se determinaron fueron: Cerio, Lutecio, Uranio, Neodimio, Cesio, Escandio, Rubidio, Hierro, Cobalto, Lantano, Torio y Europio. A partir de esos resultados y con fundamentos arqueológicos se propusieron 4 diferentes rutas de comercio, diferentes periodos de tiempo. Con los resultados obtenidos se pudo inferir que existieron diferentes rutas de comercio durante los periodos Clásico (100-850 d. C.) y Posclásico (900-1500 d.C.), y de se terminó que los principales yacimientos que surtieron de obsidiana, a la región de Tierra Caliente fueron en primer lugar los yacimientos de la región de Zináparo-Varal Michoacán, de menor importancia son los de Magdalena-Teuchitlán Jalisco, Zináparo Michoacán y Sierra de las Navajas.

S. Elizalde Rodarte y C. Mandujano (Tesis ENAH 2000), hicieron una investigación sobre "Tipología y Funcion de Herramientas con la Aplicación de Técnicas de SEM, PIXE, y NAA". Para esta investigación, se analizaron 300 raspadores de obsidiana y 2 talleres de un total de 35 sitios contemporáneos al Postclásico del Altiplano Central Mexicano, que se ubican en una porción del antiguo Señorío de Metztlán, en el actual Estado de Hidalgo.

Los objetivos fueron: determinar cual fue el uso que se les dio a los raspadores de obsidiana de Metztlán; para este fin se analizaron huellas de uso en material de superficie y conocer la fuente de obsidiana de donde se obtenía el material para fabricar los raspadores.

La técnica de AAN se uso para detectar las concentraciones de los elementos químicos de 24 raspadores arqueológicos y dos muestras del yacimiento de Zacualtipán. De los resultados obtenidos de estos análisis se pudo inferir que las concentraciones de los elementos presentes en las muestras y su similitud con los del yacimiento nos indica que los raspadores fueron manufacturados con la obsidiana de Zacualtipán.

Otro de los análisis que se realizaron fue el funcional, el cual consiste en determinar la función de los artefactos a través de huellas de uso, para esto se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido. De acuerdo a los resultados obtenidos se concluyo que los raspadores de obsidiana fueron utilizados para el raspado de cajete de maguey para la producción de aguamiel y/o pulque.

R. L. Cruz Jiménez (Tesis ENAH 2000) llevo a cabo una investigación sobre "Los caminos de la obsidiana en el región de El Tajín, análisis de procedencia mediante AAN". En esta trabajo se analizaron 21 muestras de obsidianas arqueológicas provenientes de la región del Tajín. Se analizaron también muestras provenientes de yacimientos de las siguientes regiones: Sierra de Hidalgo, Zaragoza Puebla, Oyameles Puebla, Altotonga Veracruz, Zacualtipan Hidalgo. De los resultados obtenidos se llevaron a cabo gráficas bivariables de los siguientes elementos: Th/Dy, Ba/Sc, Eu/Dy, Ba/La, Ba/Dy y una gráfica trivariante en la que se graficó Fe/ Eu/ Lu.

Del análisis estadístico de los resultados de las mencionadas gráficas se logró determinar que cinco yacimientos surtieron obsidiana a la región de El Tajín además de otros dos previamente reportados en la literatura: Zacualtipan, Altotonga, Oyameles-Zaragoza, Tulancingo, Sierra de Pachuca, El Paraíso y Zinapécuaro.

De especial importancia son las fuentes de Altotonga, Oyameles-Zaragoza y Sierra de Pachuca; dados que son ejemplos de distintos periodos culturales en la región. El consumo de obsidiana de Altotonga está más vinculado al Formativo y Protoclásico.

Oyameles-Zaragoza es la fuente que más obsidiana surtió a la región de El Tajín a lo largo del Clásico y Epiclásico.

La técnica de NAA es adecuada para la caracterización de obsidianas, sin embargo es una técnica destructiva. En los años ochenta se desarrolló una nueva técnica denominada PIXE (Proton Induced X-Ray Emission), que permite la caracterización de obsidianas sin destruirlas.

Otro método analítico que ha tenido gran aplicación en el análisis de piezas arqueológicas es el método PIXE (Proton Induced X-Ray Emission).

En los años setenta un grupo de investigadores<sup>(2)</sup> demostraron que la emisión de rayos X inducida por iones como los protones acelerados, podría ser utilizada con propósitos analíticos. Así Johansson<sup>(3)</sup> et al llevaron a cabo los primeros experimentos. Estos investigadores usaron como proyectiles protones, para el análisis de una cerámica, y determinaron que la mínima cantidad de elemento que podían detectar con este método era del orden de algunos picogramos ( $10^{-12}$  g).

Así después de numerosos trabajos de investigaciones de análisis de diversos materiales efectuados con diferentes proyectiles, se demostró que la emisión de rayos X producida con partículas cargadas abre un vasto campo en el análisis de elementos que se encuentran a niveles muy pequeños de concentración.

La interacción de la radiación electromagnética o corpuscular con la materia, así como ciertos fenómenos nucleares puede dar lugar a la formación de lagunas electrónicas.

Los procesos se acompañan de una liberación de energía, bajo dos formas: mediante la emisión de rayos X ó la emisión de electrones Auger.

Por ejemplo la formación de una vacancia en la capa K de un átomo de hierro. Esta vacancia puede ser llenada por electrón de la subcapa L<sub>II</sub>. La diferencia de energía entre los dos niveles puede aparecer como un fotón X de energía  $E_X = h\nu_X = E_K - E_{LII}$ . Esta línea es característica de hierro ( $K\alpha$ ) con una energía 6.4 KeV una radiación electromagnética de cierta energía, se produce por efecto fotoeléctrico o Compton.

Las fuentes de fotones son tubos de rayos X o fuentes radiactivas. Un ejemplo de tales fuentes son:  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{241}\text{Am}$ .

## 2. EXCITACIÓN CON PARTÍCULAS CARGAS

El frenado de iones de energías elevadas en la materia se lleva a cabo por colisiones electrónicas. Los electrones son eyectados y las vacancias producidas dan a la emisión de rayos X. En 1912 se llevaron a cabo las primeras observaciones de emisión de rayos X Característicos de diversos elementos, excitados con partículas alfa. Los primeros experimentos con partículas aceleradas fueron llevado a cabo en 1930. Los iones utilizados fueron protones de bajas energías (algunas centenas de KeV).<sup>(4)</sup>

La primera interpretación teórica de este fenómeno fue hecha por Gerthsen,<sup>(5)</sup> quien propuso que en el caso de protones se producía un choque elástico entre la partícula incidente y un electrón de las capas externas del átomo. En la actualidad se ha demostrado que la ionización es el resultado de la interacción coulombiana entre la partícula incidente y un electrón ligado.

El frenado de iones de energías elevadas en la materia se lleva a cabo por colisiones electrónicas. Los electrones son eyectados y las vacancias producidas dan a la emisión de rayos X. En 1912 se llevaron a cabo las primeras observaciones de emisión de rayos X Característicos de diversos elementos, excitados con partículas alfa. Los primeros experimentos con partículas aceleradas fueron llevado a cabo en 1930. Los iones utilizados fueron protones de bajas energías (algunas centenas de KeV).<sup>(4)</sup>

Para iones más pesados la ionización resulta de una interacción de las capas electrónicas en el momento de la colisión.

En el ININ se cuenta con un acelerador de partículas TAMDEM , para llevar a cabo esta técnica.

### Fluorescencia de Raros X

La fluorescencia de rayos X se basa en la generación de rayos X característicos para elementos de número atómico mayor a 11. Al irradiar la muestra con un haz de rayos X o  $\gamma$  se origina la emisión de rayos X secundarios o fluorescentes. La radiación inducida esta compuesta por fotones de energías características para cada elemento presente en dicha muestra.

Dicha emisión de fotones se produce debido a que la radiación proveniente de las fuente de excitación, al tener una energía lo suficientemente alta, arranca electrones de las órbitas más internas dejando al átomo ionizado y excitado por el vacío generado en la órbita afectadas, por o que el átomo retornará a su estabilidad por sucesivas transiciones electrónicas desde estados de alta energía a estados de baja energía.

La radiación secundaria es emitida, en cada transición electrónica, con una energía igual a la diferencia entre las energías de enlace de los electrones de su respectiva capa, lo que da lugar a la emisión de rayos X característico del átomo del elemento que se excita, pudiéndose llevar un análisis cualitativo y cuantitativo. Los rayos X son detectados con un sistema de espectrometría de rayos-X en energía dispersiva, el detector semiconductor utilizado es el de Si(Li).

Esta técnica se ha aplicado en el análisis multielemental de estos óseos, para la reconstrucción de paleodieta<sup>(6)</sup>

### Datación de Restos Óseos

El propósito de esta investigación es la datación de algunos restos óseos de mamut provenientes de la Cuenca del Valle de México, con la técnica "serie de uranio" , que consiste en la determinación las relaciones isotópicas  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  y  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  . Con el fin de determinar la

eficiencia de este método radioquímico se determinó la concentración de uranio en microgramo por gramo de los restos óseos con espectrofotometría UV visible. Algunas muestras no pudieron ser datadas, así que se realizó un estudio con microscopía electrónica de barrido y de difracción de rayos X, en dos muestras para determinar los factores que limitan la técnica de la serie de uranio, para la datación de algunos restos óseos en este caso particular de mamut.

La determinación de uranio (U) y torio (Th), es parte fundamental de la técnica "serie de uranio" y es una técnica alternativa para la datación de restos óseos en nuestro país. Este método fue desarrollado originalmente para la datación de material geológico, pero en esta investigación se extrapolo este método para el estudio de material arqueológico de una antigüedad de mas de 10,000 años. En esta investigación se determino la edad de algunas muestras de mamut provenientes de la Cuenca del Valle de México.

La técnica de la serie de uranio se basa en la información que se encuentra presente en la estructura del hueso que puede ser utilizada como una "biblioteca" antropológica, para obtener diferentes datos, entre éstos su edad. El método "serie de uranio", aplicado principalmente para el fechado de agua o materiales geológicos, como las rocas, ha resultado ser eficaz; en esta investigación con esta técnica ha sido posible obtener buenos resultados en muestras de hueso, a diferencia de los procedimientos establecidos por varios autores, para el fechado de huesos, se separaron a los radionúclidos de Uranio y torio con la técnica de cromatografía de reparto líquido-líquido.

Científicos como J. Korkisch, han efectuado estudios de restos fósiles y sedimentos marinos con la finalidad de establecer nuevos métodos de datación. Yocoyama, propuso nuevas técnicas para fechar muestras marinas a través de la evaluación del cociente de actividades del  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  así como las del  $^{230}\text{Th}$  (Ivanovich, 1992).

El fundamento del fechamiento absoluto de la serie de uranio, se basa en la incorporación del uranio del medio al resto óseo durante dos siglos. Transcurrido este tiempo se producen los descendientes radio génicos del uranio. Por lo que este método se basa un fenómeno que es función matemática del tiempo. Para éste tipo de fechamiento hay métodos radiactivos y no radiactivos. Los métodos radiactivos se basan en el decaimiento radiactivo de algún radioisótopo, para poder establecer las condiciones apropiadas de fechamiento. Entre éstos se encuentra la técnica de la serie de uranio, etc.

Las muestras que fueron analizadas se muestran en la figura siguiente: Lugares de procedencia de los fósiles de mamut para su datación. En donde M1= Base aérea militar de Sta Lucía, Zumpango Edo. de Méx., M2= Colonia lago de Gpe. Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx. M3= Las tórtolas, Tultitlán, Edo. de Méx., M4= Santa Martha Acatitla, D.F. M5= Texcoco, Edo. de Méx. M5= Texcoco, Edo. de Méx.



## Técnica “serie de uranio”

Los huesos fósiles contienen concentraciones de uranio que van de 1 a 1000 ppm, mientras que en huesos modernos la concentración no excede de 0.1 ppm. Esto indica que la capa externa del hueso absorbe el uranio en un tiempo de 2000 años (2ka) y subsecuentemente se comporta como un sistema cerrado (Schwarcz, 1982).

El método “serie de uranio” se basa en el crecimiento radiactivo de los hijos del uranio 238 ( $^{238}\text{U}$ ), entre los que se encuentra el torio 230 ( $^{230}\text{Th}$ ) con un tiempo de vida media de 75.38 Ka (kilo-años). Los huesos modernos no contienen torio, después de la muerte del espécimen, en la matriz del hueso hay una reducción del uranio soluble (VI) complejo a uranio insoluble (IV). El uranio es absorbido por la fase mineral del hueso y la formación del torio comienza. Así, el cociente de actividades entre uranio y torio aumenta paulatinamente.

El cociente de actividad  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  para condiciones de sistemas cerrados proporciona la edad del fósil, sin embargo, el desequilibrio entre  $^{234}\text{U}$  y  $^{238}\text{U}$  que se encuentra presente en el ambiente debe ser tomado en cuenta para calcular la edad (Cherdynstev, 1955). En este estudio, el cálculo de la edad es hecho a partir de un conjunto de principios que hacen posible la iteración de la siguiente función del tiempo, suponiendo que en la etapa inicial de fijación del uranio no se encuentra presente el  $^{230}\text{Th}$  (Ivanovich and Harmon, 1992).

$$\frac{^{230}\text{Th}}{^{234}\text{U}} = \left( \frac{1 - e^{-\lambda_{230} t}}{^{234}\text{U}/^{238}\text{U}} \right) + \left( 1 - \frac{1}{^{234}\text{U}/^{238}\text{U}} \right) \frac{\lambda_{230}}{(\lambda_{230} - \lambda_{234})} \left( 1 - e^{-(\lambda_{230} - \lambda_{234}) t} \right)$$

Donde  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  y  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ , son medidas de su radiactividad;  $\lambda_{230}$  y  $\lambda_{234}$  son las constantes de decaimiento del  $^{230}\text{Th}$  y  $^{234}\text{U}$  respectivamente. Las medidas de radiactividad son calculadas por espectrometría alfa (Michel, 2000), como se apreciará más adelante.

Para la determinación de las relaciones isotópicas  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  y  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  se requiere que se efectúe el pretratamiento de la muestra uranífera que consiste en su limpieza, reducción del tamaño, tamizado, homogeneizado, envasado y almacenamiento, seguido del análisis elemental para determinar la composición química de la muestra, así como la de sus fases cristalinas, posteriormente se disuelve mediante su digestión con ácidos, y se ajusta la concentración a un valor menor a 1M de ácido clorhídrico que es el medio en el cual, a través de estudios realizados y reportados en la literatura, ha quedado demostrado que se obtiene el mayor porcentaje de eficiencia separación de los radionúclidos (Ordoñez, 1982). Dicha separación se logra mediante la aplicación de la cromatografía de reparto líquido-líquido que utiliza como soporte inerte a los gránulos de teflón, dichos gránulos se impregnan con ácido di-2-etil-hexil-fosfórico (D2EHPA) y posteriormente se hace pasar una solución de HCl concentrado como activador, esto está soportado en una columna de vidrio, el (D2EHPA) retiene al uranio y a los radionúclidos filiales de su proceso de decaimiento ( $^{230}\text{Th}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ), esta separación se logra mediante la utilización de las soluciones que se muestran a continuación:

ELEMENTO	SOLUCIÓN
Hierro	HCl 3M
Uranio 238 y Uranio 234	HCl concentrado
Torio 230	Mezcla ácido oxálico 0.05M – ácido nítrico 0.5 M.

Posteriormente, mediante evaporación se concentran las soluciones y se efectúa la electrodeposición en una celda electrolítica, sobre discos de acero inoxidable, utilizando para cada radionúclido un electrolito específico tal como se muestra a continuación:

RADIONÚCLIDO	ELECTROLITO
URANIO	Fluoruro de sodio 1M
TORIO	Ácido sulfúrico 0.1M

Una vez que se obtienen las relaciones isotópicas, antes mencionadas, podemos determinar la edad de los fósiles de forma directa mediante la utilización de una gráfica reportada en la literatura, en donde se encuentran representadas gráficamente las relaciones isotópicas  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  vs  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ .

Para determinar la concentración de uranio en los huesos se utiliza la técnica de espectrofotometría UV (visible).

Se llevaron a cabo 12 experimentos, en donde fue necesario una preparación de la muestra, seguido de un análisis elemental PIXE, este se llevo a cabo preparando las muestras de una forma homogénea, para obtener resultados representativos y difracción de rayos X para conocer su composición química y estructura. En seguida se disolvió la muestra en diferentes soluciones, con el fin de separar al hierro, uranio y torio. Este proceso se efectuó en una columna cromatográfica de reparto líquido – líquido mediante la elución selectiva de cada fracción, en seguida se concentraron las soluciones obtenidas mediante evaporación, y posteriormente se hicieron los electrodepositos de los diferentes radioisótopos, sobre discos de acero inoxidable que posteriormente fueron analizados mediante espectrometría alfa, en donde se obtuvieron las áreas de los picos y se calcularon las relaciones isotópicas las cuales sirvieron para determinar de forma directa la edad de cada fósil mediante la utilización de las gráficas adecuadas. Y fueron obtenidos los siguientes resultados que se muestran en la tabla siguiente:

MUESTRA	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	EDAD años
<b>M1</b>	1.53 ± 0.04	0.19 ± 0.0038	<b>17850 ± 70.71</b>
<b>M2</b>	1.02 ± 0.02	0.013 ± 0.0004	<b>N.P.</b>
<b>M3</b>	1.40 ± 0.0	0.313 ± 0.0	<b>39500 ± 707</b>
<b>M4</b>	1.00 ± 0.0	1.55 ± 0	<b>N.P.</b>
<b>M5</b>	N.P.	N.P.	<b>N.P.</b>
<b>M6</b>	1.36 ± 0.04	0.27 ± 0.04	<b>26150 ± 2616</b>

Tabla 1. Fechas obtenidas aplicando la técnica “serie de uranio”

En esta tabla se observa que únicamente 3 de las 6 muestras de estudio pudieron ser datadas y son: M1, M3, y M6.

Con el fin de determinar la eficiencia del método radioquímico se determinó la concentración de uranio en microgramo por gramo de los restos óseos con espectrofotometría UV visible.

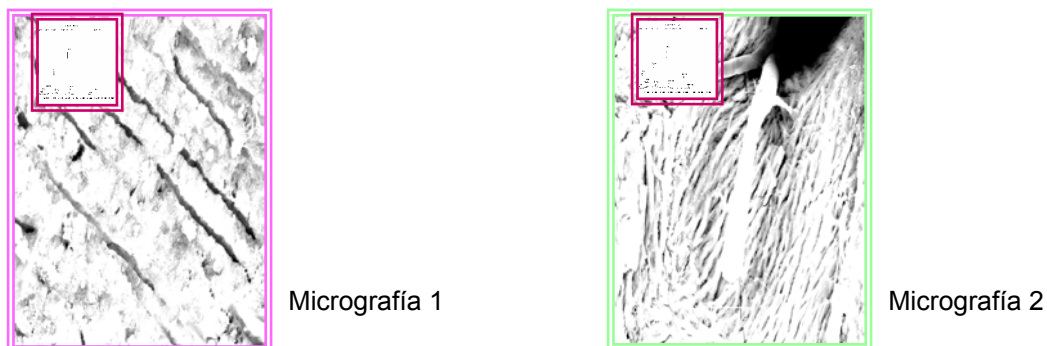
En la tabla 2, se muestran los resultados de las concentraciones de uranio en microgramo por gramo (ppm).

Debido a que en algunas de las muestras que se analizaron no se obtuvo uranio ni torio, fue necesario investigar las causas por las cuáles dicho fenómeno se presentó, trayendo como consecuencia el impedimento para poder realizar su fechamiento, pero debido a la cantidad reducida de muestra con la que se contaba, dicho estudio no fue posible realizarlo en todas las muestras. Se consideró apropiado estudiar

MUESTRAS	CONCENTRACIONES EN MICROGRAMO POR GRAMO (PPM).
<b>M1</b>	2.5451
<b>M2</b>	16.546
<b>M3</b>	2.0710
<b>M4</b>	10.048
<b>M5</b>	N.P.
<b>M6</b>	42.958

*Tabla 2. Concentraciones de Uranio en las muestras.*

una muestra en la que se hubiera obtenido una cantidad considerable de uranio y torio, y otra en la que no se hubiese obtenido ninguno de los dos radionúclidos y con la utilización del microscopio electrónico de barrido, se obtuvieron las micrografías que muestran la microestructura del hueso, así como sus respectivos análisis EDAX, de regiones específicas de la superficie de cada muestra. En la figura 2 se presentan las micrografías en las que se observa el marcado deterioro de la muestra (micrografía 1) a la que no se le determinó uranio ni torio; y por otra parte observamos en la micrografía 2, que la muestra se encuentra en buen estado, y corresponde a la que presentó la más alta concentración de uranio torio.



*Figura 2 Micrografías de los huesos de mamut*

Entre los diferentes métodos para la datación de restos óseos que actualmente existen se encuentran: técnica de  $^{14}\text{C}$ , la técnica del colágeno, la técnica del hueso cremado, que tienen el inconveniente de ser muy costosas o poco confiables; por lo que en esta investigación se eligió el método radioquímico “serie de uranio” por ser un método fiable; aunque es un trabajo complicado, debido a que la concentración de uranio y torio en los huesos es pequeña, se caracteriza por no ser una técnica muy costosa. La ventaja principal que ofrece es que brinda un amplio rango de fechados, pero la obtención de buenos resultados depende de forma considerable del estado de conservación del hueso. Al término de la presente investigación se concluyó lo siguiente:

\*La tasa de recuperación de uranio y torio es del orden de 95%, esto se confirmó, al pasar una solución estándar de U y Th de concentración conocida, por la columna cromatográfica. La

solución fue tratada como las demás muestras y fue electrodepositada; posteriormente se determinó la concentración de la solución sobrante por espectrometría U.V (visible), y a través de una relación matemática, se obtuvo el porcentaje de recuperación de uranio y torio.

\* Se comprobó que a pesar de pertenecer las muestras a la misma cuenca (M5 y M6), el grado de deterioro es completamente diferente, debido a la variabilidad de las condiciones en las que se encuentra el suelo en el que estuvieron enterrados los restos óseos. El estado de conservación del hueso, se puede verificar a través de los estudios de microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X y nos permite establecer las condiciones en las que el método radioquímico de fechado es aplicable con un buen grado de exactitud.

\* Esta técnica de fechado es aplicable para muestras que tengan una edad superior a los 10000 años.

\*Este trabajo es importante, debido a que en nuestro país se cuenta con una gran cantidad de vestigios paleontológicos y no se tenía una técnica confiable, económica, y con un amplio rango de fechado, así que queda establecido el método "serie de uranio" para ser utilizado en el fechado de restos óseos.

### **Metalografía**

La metalurgia en general es una de las actividades prehispánicas que han sido poco estudiadas por la arqueología mexicana, y todavía son aún más restringidos o casi nulos los estudios arqueológicos metalúrgicos en la zona del altiplano central, específicamente en la zona de interés "El Templo Mayor de Tenochtitlán", si comparamos con otras investigaciones que se han efectuado en diversas áreas mesoamericanas, como podría ser la esfera cultural del Occidente; por lo cual consideramos que es importante ocuparnos de este tipo de estudios, desde un punto innovador, mediante la aplicación de métodos experimentales dando como resultado el conocimiento de diversos aspectos tales como origen (banco de datos), desarrollo tecnológico (técnicas de manufactura), cuestiones de índole comercial, política, religiosa entre otras. Estos temas son abordados generalmente por personas e instituciones extranjeras, por eso mismo es necesario enfatizar e incrementar el desarrollo de este tipo de investigaciones nacionales bajo estos rubros. Es fundamental vincular otras áreas de análisis, las cuales incorporan otras perspectivas, incrementando el estudio de la metalurgia prehispánica en general. La parte principal de esta investigación consiste en el uso de técnicas nucleares, y métodos convencionales aplicados a la caracterización de material metálico para determinar técnicas de manufactura, inferencias culturales, relaciones comerciales-culturales, autenticidad, etc.

En la mayoría de los estudios de los diversos materiales arqueológicos se queda en un primer plano y se dan solamente resultados subjetivos, por lo que es necesario aplicar métodos científicos sustentables, para entender procesos culturales al través de estos análisis.

El estudio con análisis nucleares y convencionales para la investigación de material arqueológico es muy escaso este se desarrolla en los países europeos y muy pocas veces se realizan en nuestro país. Por lo es necesario incrementar este tipo de estudios y de esta forma poder entender diversos avances tecnológicos: como son conocer la composición elemental de un artefacto, así como determinar si se utilizaron aleaciones intencionales, conocer si se realizaron soldaduras en los anillos de suspensión, si hay influencias de otras culturas, en cuanto a diseños se refiere, entre otras preguntas. Estos datos son recuperados por medio de las técnicas nucleares nucleares, para conocer e interpretar el desarrollo de las actividades tecnológicas de las comunidades prehispánicas.

En cuanto a la selección de muestras para este estudio no fueron elegidas al azar tuvieron que cumplir con ciertos requisitos:

1. Materiales que no hubieran sido consolidados por los restauradores; ya que esto interferiría en los resultados de los análisis experimentales.
2. Objetos que contaran con 70% y 80% de metal sano ya que en general el material metálico del Templo Mayor de Tenochtitlán se encontraba en un ambiente de humedad y así poder aplicar con facilidad las técnicas de análisis.
3. Objetos que contaran con 70% y 80% de metal sano; con estos porcentajes estamos hablando de un rango alto de metal no corroído; ya que sabemos que en general el material metálico del Templo Mayor de Tenochtitlán se encontraba en un ambiente de humedad.
4. Objetos de diversas ofrendas para tener una mejor visión comparativa y de similitud.
5. Piezas elaboradas con diferentes formas y materia prima (cobre y oro).  
Con las técnicas de PIXE, RBS, metalografía y microscopía electrónica de barrido, se pueden analizar artefactos metálicos prehispánicos. De los resultados de estos análisis se puede inferir: la técnica de manufactura, el periodo en que estas piezas fueran hechas así como el tipo de material utilizado.

Se analizaron con las técnicas mencionadas anteriormente veinte objetos metálicos provenientes de diez ofrendas, localizadas en el Templo Mayor de Tenochtitlán.

A continuación se da una descripción de los artefactos metálicos, así como las técnicas usadas para su estudio:

No. de ofrenda	Descripción	Tipo de Análisis.
3	2 discos de oro 2 cuentas de oro 1 mascarilla	PIXE RBS Metalografía
6	1 cascabel de cobre	PIXE, Metalografía
9	1 cascabeles de cobre	PIXE, RBS, Metalografía
11	2 cascabeles de cobre	PIXE, RBS, Metalografía
13	2 cascabeles de cobre	PIXE, RBS, Metalografía
20	2 cascabeles de cobre	PIXE, RBS, Metalografía
22	1 cascabel de cobre	PIXE, RBS, Metalografía
60	1 cascabel de cobre	PIXE, RBS, Metalografía
70	3 cascabeles de cobre	PIXE, RBS, Metalografía
77	2 cascabeles de cobre	PIXE, RBS, Metalografía

*Tabla 1 Ofrendas analizadas del Templo Mayor de Tenochtitlán.*

### 3. TÉCNICA METALGRÁFICA

Con la técnica de metalografía se determina tamaño y forma del grano, distribución de fases que componen la aleación, inclusiones, tipo de corrosión, segregaciones, fracturas y heterogeneidad.

Para llevar a cabo el estudio metalográfico de las piezas, se procedió de la siguiente manera:

1. Para eliminar residuos de tierra en cada una de las piezas se limpiaron en un baño de ultrasonido marca Bueheler modelo Ultrament, con una solución de extra n al 5% durante un periodo que varió de 5 a 30 segundos dependiendo del estado de deterioro de la muestra; cabe aclarar que con este proceso no se retira la pátina, ni se daña la muestra.
2. Para eliminar la pátina de la superficie de la pieza y obtener un núcleo sano se eligió una parte de aproximadamente 4 mm con la ayuda de un microscopio óptico, cabe señalar que ésta debe ser representativa y homogénea, ya que esta superficie tiene que ser desbastada en 3 niveles, para

esto se uso un bisturí para retirar la pátina, se continua con un desbaste de la pieza con un moto-tool (marca Dremel 285 type 4, 1500 revoluciones) el cual elimina completamente la pátina, obteniéndose de esta forma lo que se denomina "núcleo sano". Con el fin de eliminar la capa distorsionada producida por el moto - tool, se limpió esta superficie durante 40-60 seg. con persulfato de amonio al 10%, reactivo recomendado por las normas oficiales (NOM-B79-1988); posteriormente esta superficie se lava con agua y alcohol etílico para eliminar los residuos del reactivo y se seca.

Una vez preparado el "núcleo sano" se procedió a observarlo en el microscopio metalográfico (Versament) con un aumento que varía entre 50-1200 aumentos según la muestra por estudiar.

#### **4. TÉCNICA PIXE**

Cuando un haz de iones interacciona con los electrones de los átomos del metal. Se produce la ionización de los átomos, éstos quedan excitados y para regresar a su estado natural se lleva a cabo la emisión de los rayos x, estos son característicos de los átomos que lo emiten.

Además por medio de las emisiones de rayos x característico de los metales se determina la composición elemental de estos. La técnica PIXE permite la detección de elementos de número atómico superior al 11 (sodio)".

Para efectuar nuestro análisis, las 20 piezas se irradiaron con un haz de protones de 2.6 Mev; del acelerador Tandem-Van de Graff, del ININ. Este haz es externo, es decir sale al aire por lo que se pueden analizar piezas completas, sin necesidad de destruirlas.

#### **5. TÉCNICA DE RBS**

La técnica de RBS sirve para estudiar la superficie de la pieza metálica y consiste en que al incidir un haz de partículas penetran al metal e interaccionan con el núcleo de los átomos que forman el metal, las partículas se dispersan. Con los espectros de RBS obtenidos se puede determinar la composición elemental y su distribución en la superficie.

El experimento se realizó en el acelerador de partículas Peletron del Instituto Nacional de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México. Esta técnica nos va especificar la cuantificación de los elementos ligeros, que no se aprecian en los espectros de PIXE y además nos ayuda a corroborar si existen técnicas intencionales de dorado en superficie en los ornamentos.

#### **6. RESULTADOS y CONCLUSIONES**

En esta investigación fueron analizadas mediante PIXE y metalografía un total de 20 piezas metálicas de las cuales fueron 15 cascabeles de cobre, mientras que las piezas restantes dos cuentas con núcleo de barro, dos discos y un cascabel antropomorfo todos ellos manufacturados con base de oro, también fueron analizados con la técnica de RBS.

Mediante las técnicas de PIXE y RBS, se pudo confirmar que todos los cascabeles se manufacturaron con una aleación de cobre-arsénico que variaron entre el 1 y 3 %; que dio como resultado una mejor dureza, maleabilidad y resistencia. De acuerdo a los resultados de que los objetos analizados tengan un alto contenido de arsénico indica, que su manufactura se realizó con cobres procedentes de una reducción de sulfuros y por lo tanto no se trata de cobres nativos o carbonatados. Cabe mencionar que mediante este tipo de aleaciones se puede obtener una tonalidad plateada, lo que se asocia a las escreeencias de la deidad lunar, desde un punto de vista mítico-mágico-religioso; en el caso específico de los cascabeles interesados en este estudio, podemos mencionar que no hubo ningún cambio de color ya que los porcentajes de arsénico son realmente bajos.

Cabe mencionar que mediante este tipo de aleaciones se puede obtener una tonalidad plateada, lo que se asocia a las excreencias de la deidad lunar, desde un punto de vista mítico-mágico-religioso; en el caso específico de los cascabeles interesados en este estudio, podemos mencionar que no hubo ningún cambio de color ya que los porcentajes de arsénico son realmente bajos.

Otro punto relevante es que se analizaron mediante RBS las uniones de las argollas de suspensión de los cascabeles, para identificar la presencia de soldadura. De los resultados de los análisis micro estructurales y elementales se pudo inferir que los cascabeles fueron manufacturados de una sola pieza, no se encontró ningún tipo de soldadura.

De acuerdo con los resultados obtenidos del estudio metalográfico se infiere que los 15 cascabeles pertenecientes a las ofrendas (6, 11, 13, 20, 22, 60, 70, 77) fueron manufacturados con la técnica de la cera perdida. Esto se pudo interpretar a través de las foto micrografías obtenidas de cada una de las piezas, ya que se observó en las foto micrografías una solución sólida, se apreciaron granos equiaxiales, además de segregaciones, pérdida de material, picaduras, esto es debido a la corrosión existente en la pieza micro estructurales son típicas de las piezas manufacturadas con la técnica a la cera perdida.

En cuanto a su decoración no se observó ningún tipo de detalle como podría ser un falso alambre, o diseños rebuscados y adosados al cuerpo del cascabel entre otros; esto es parte sustancial para decir que las ofrendas no son de una alta jerarquía; los cascabeles son piezas muy comunes que tienen múltiples funciones desde ornamentales hasta de carácter funerario.

Se determinó una "cronología relativa" en donde posiblemente fueron manufacturados los materiales, a partir del 1200 d.C. esta fecha fue denominada como el "Periodo de las aleaciones", modelo propuesto por Hosler para la zona de Occidente, y el cual fue extrapolado a los objetos de estudio.

Otro punto relevante fue que no se detectaron aleaciones con estaño en ninguno de los cascabeles en algunas ocasiones obtenemos objetos elaborados con cobre - arsénico - estaño, o al menos estos dos últimos en trazas; de con esto surgen muchas interrogantes, ya posiblemente nuestro universo de muestras es muy pequeño, o tal vez habla una intencionalidad en poner únicamente piezas de una tonalidad en determinadas ofrendas; o ciertamente el abastecimiento de yacimientos de estaño era nulo en esa época.

En cuanto al resto de las piezas (dos discos, dos cuentas y un cascabel antropomorfo) de la ofrenda 3, se pudo concluir lo siguiente: de acuerdo a los resultados de PIXE se pudo determinar que los objetos se elaboraron a partir de altas concentraciones en oro y plata y bajas en cobre.

Mediante RBS, se observó que no existe un dorado en superficie intencional de los objetos, son piezas homogéneas.

Se concluyó mediante PIXE y RBS, que los discos presentaron concentraciones del 70 % de oro y 27 % de plata y entre 1 y 2 % de cobre. Mediante la técnica metalográfica se apreció una micro estructura de inclusiones alargadas, éstas son pertenecientes a la técnica de martillado, logrando un laminado extremadamente delgado, estos objetos son generalmente ornamentales aunque en algunas ocasiones son depositados en contextos funerarios, como fue este el caso

Las cuentas con núcleo de barro presentaron una estructura con líneas de bandeo, lo que es característico del martillado con un posible calentamiento del metal para contar con una mayor maleabilidad y dureza; esta lámina servía de envoltura al núcleo de barro, es posible que se volviera a fundir para dar un acabado estilístico perfecto; sus concentraciones por PIXE variaron entre 75% y 53% de oro.

Por último, el cascabel antropomorfo presentó una micro estructura equiaxial, que como ya se ha dicho antes es típica de la técnica a la cera perdida, contó con un porcentaje del 62% de oro. La "fecha relativa" de manufactura es a partir del 1200 d.C. periodo de las aleaciones.

Estas piezas presentan un alto acabado estético y tecnológico; logrado únicamente por los orfebres antiguos, por lo tanto se puede inferir que la ofrenda que contiene estos elementos es de una alta jerarquía.

En cuanto a su deterioro hay un menor grado de corrosión intra granular y pérdida de material, en comparación con las piezas de cobre; ya que los objetos que contienen porcentajes de oro son menos corroídos.

.Mediante RBS, se observó que no existe un dorado en superficie intencional de los objeto, son piezas homogéneas. Se concluyó mediante PIXE y RBS, que los discos presentaron concentraciones del 70 % de oro y 27 % de plata y entre 1 y 2 % de cobre.

Mediante la técnica metalografía se apreció una micro estructura de inclusiones alargadas, éstas son pertenecientes a la técnica de martillado, logrando un laminado extremadamente delgado, estos objetos son generalmente ornamentales aunque en algunas ocasiones son depositados en contextos funerarios como fue este el caso

Las cuentas con núcleo de barro presentaron una estructura con líneas de bandeo, las cuales también son características del martillado con un posible calentamiento del metal para contar con una mayor maleabilidad y dureza; esta lámina servía de envoltura al núcleo de barro, es posible que se volviera a fundir para dar un acabado estilístico perfecto; sus concentraciones por PIXE variaron entre 75% y 53% de oro.

Por último, el cascabel antropomorfo presentó una micro estructura equiaxial que como ya se ha dicho antes es típica de la técnica a la cera perdida, contó con un porcentaje del 62% de oro.

Estas piezas presentan un alto acabado estético y tecnológico; logrando una especialización de los orfebres antiguos, por lo tanto se puede inferir que la ofrenda que contiene estos elementos es de una alta jerarquía.

. La "fecha relativa" de manufactura es a partir del 1200 d.C.; periodo de las aleaciones.

. En cuanto a su deterioro hay un menor grado de corrosión intragranular y pérdida de material, en comparación con las piezas de cobre; ya que los objetos que contienen porcentajes de oro son menos corroídos.

Todas las piezas son auténticas con un alto valor simbólico; donde se pudo apreciar una alta especialización tecnológica.

## **7. BIBLIOGRAFÍA**

1. ASTM-E-112. "Standard Test Methods for Determining Average". Grain Size. 1988
2. Bargallo, Modesto. "La minería y la metalurgia en América Española en la Época Colonial". F.C.E.
3. Bogdanov and R. A. Kuznetsov. 1974. Chromatographic and  $\alpha$  spectrometric method of determination of uranium. Translated from Radiokhimiya. Vol. 17. No. 4.
4. Brown, James A. "Approches to the Social Dimensions of Mortuary Practices". ed. 18. U.S.A The Society for American Archaeology. Fondo Isabel Kelly. 1971
5. E. Brawne, J. M. Daivile, R. E. in Eds. C. M. Lederer and V. S. Shirley Table of Isotopos (J. Willey and Sons, Inc., New York, Chichester, Birsbane, Toronto 1978.

6. Brush Charles F. "Pre-Columbia Metal and Alloy Artefacts from Costal Guerrero, México". Science, V. 138, N. 3547. Washington D.C 1962.
7. R. H. Cobean, J. Vogt, M. Glascock. High-precision trace-element characterization of major mesoamerica: obsidian sources and further analysis of artefacts from San Lorenzo Tenochtitlan Mexico". Latin American Antiquity, 2(1) pp 69-91 1991.
8. Calvo, F.A. "Metalografía práctica". Catedrático de Metalurgia en el Instituto Tecnológico
9. Metalúrgico, Emilio Jimeno, de la Universidad de Barcelona. 1975
10. Calvo, F.A. "Vertix 18 Textos Auxiliares de las clases prácticas". Sección 1 Química 10. ed. Alhambra. Madrid, España. 1972
11. R. L. Cruz Jiménez "Los Caminos de la obsidiana en la región del Tajín" Análisis de Procedencia.. Tesis Escuela Nacional de Antropología e Historia 2000.
12. J. M. Elam, M. D. Glascock y L. Finsten. The implantation of obsidian artifact provenience from Jalieza, Oaxaca, Mexico. Archaeometry 90 pp 365-374.(1999)
13. S. V. Elizalde Rodarte, C. Mandujano Alvarez Los raspadores de obsidiana del Señorío de Metztitlan, Hidalgo Topología y función de herramientas con la aplicación de técnicas de SEM, PIXE y NAA. Tesis de licenciatura ENAH. (2000)
14. Easby, Dudley T. "Sahagún y los orfebres precolombinos de México". Anales del Instituto
15. Nacional de Antropología e Historia. Tomo IX, México-Berlín, Pub Walter De Gruyter Co. Tafel 99.
16. Endergast, David. "Metales Artifacts in Prehispanic Mesoamerica Abstract. For American
17. Archaeology. American Antiquity, Vol. N° 4, Menasha Wisc. Apr. 1962
18. Franco, Francisca. "Métodos de análisis químicos de metales antiguos". Procesos de Cambio, XV. Reunión de Mesa Redonda S.M.A. Gto. 1979
19. J. R. Esparza. Aplicación de las técnicas nucleares PIXE y NAA, para el estudio de las redes de comercio de la obsidiana en Tierra Caliente, Michocán. 1999
20. M. Glascock, M. Elam, R. Cobean. Proceeding 26<sup>th</sup> International Symposium University of Toronto. 1988 Sourcing archaeological obsidian by an abbreviated NAA Procedure. 1994
21. D. Glascock The state of nuclear archaeology in North America. Journal of Radioanalytical H. Neff, M. Nuclear Chemistry Articles Vol. 196, No. 2 (1995) pp 273-286. 1994.
22. Grinberg de M; Torres Luis; Grinberg A. "Relaciones metalúrgicas en América Prehispánica Criterios de Aleación en el Sistema Cobre-Oro-Plata". Instituto de Investigaciones Antropológicas. 1996.
23. B. M. Gordon, H. W. Kraner, J. Radioanal. Chem. Vol. 12 (1972) 181.
24. Hosler Dorothy. "Organización Cultural de la Tecnología Aleación de Cobre en el México
25. Occidental Precolombino". Ponencia en el 45<sup>vo</sup> Congreso Internacional de Americanistas. Colección Bibliográfica, Banco de la República de Bogotá. 1985
26. Hosler Dorothy. "Ancient West Mexican Metallurgy: South and Central American Origins and West Mexican Transformations". American Anthropologist, 1988 Vol. 90, núm. 4, diciembre de, p 832-855

27. Hosler Dorothy. "Cronología tecnológica". ed. E. Williams y R. Novella Arqueología del Occidente de México, Nuevas Aportaciones. Colegio de Michoacán Morelia, México, 237-296. 1993
28. Hosler Dorothy. "The Sounds and Colors of Power". The Sacred Metallurgical Technology of Ancient West. México, MIT Press, Cambridge. 1994
29. Hosler, Dorothy, y Andrew Macfarlane. "Copper Source". Metal Production and Metals Trade in Late Postclassic Mesoamerica, Science, 1996 .N° 273, Septiembre 1819-1824.
30. Ivanovich. M and Harmon. 1992. Uranium – series disequilibrium: applications to earth, marine and environmental sciences. Clarendon Press, 2 edition. Oxford.
31. López Leonardo. "Las ofrendas del Templo Mayor de Tenochtitlán". I.N.A.H. -C.N.C.A. 1993
32. Kehl, L. Kehl. "Fundamentos de la práctica metalográfica". Aguilar-Madrid, Traducción al Español. 1963
33. Matos Eduardo. "Obras maestras del Templo Mayor". Fomento Cultural Banamex, A.C. 1988
34. Michel V. 2000. Problems Encountered in the U – Th dating of fossil red deer jaws ( Bone, dentine, enamel ) from Lazaret cave : a comparative study with early chronological data. Journal of Archaeological Science, Vol. 27. París, Francia.
35. Miranda Javier. "Técnicas analíticas de origen nuclear". Curso Introductorio, Departamento de Física Experimental. IF-UNAM. 1997
36. Montalvo Balarezo. Análisis multielemental de estos óseos por fluorescencia de Rayos X, para la reconstrucción de dietas del Periodo Temprano en la Cultura Lima. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima Perú (1997).
37. H. Neff, M. D. Glascock The State of Nuclear Archaeology In North America. Journal of
38. Radioanalytical and Nuclear Chemistry Articles. Vol. 196, No2 (1995) 275-286.
39. NOM-B79. "Métodos para la preparación de probetas metalográficas". 1988
40. E. Ordoñez.. Determinación de uranio en agua natural. Rev. Sociedad Química. 1990 Vol. 34. No 6. México.
41. Schwarcz, .H.P.. Applications of U – series dating to archaeometry. In Uraium Series disequilibrium, applications to environmental problems. 1982 Clarendon Press Great Britain.
42. Ruvalcaba, José Luis. "Análisis elemental cuantitativo mediante técnicas nucleares de piezas arqueológicas". Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM. 1993
43. Ruvalcaba, José Luis y Demortier, Guy. "Análisis no destructivos mediante haces de iones de joyas y ornamentos propios de la metalurgia del Oro de América Prehispánica". 49° 1997. Congreso de Americanistas, Quito Ecuador.

44. D. Tenorio, M. Jiménez-Reyes, G. Lagarde. Mexican obsidian samples analysed by PIXE and AAS. International Journal of PIXE. Vol. 7 Nos. 1&2 (1997) 17-24.
45. J. R. Vogt, C. Graham, M. D. Glascock, R. H. Cobean A study of Mesoamerica obsidian sources using activation Analysis.. Journal of Radioanalytical chemistry Articles. Vol. 69, No. 1-2 (1982) pp 271-289.1982