

## CARACTERIZACIÓN METALÚRGICA DE FRAGMENTOS DE PECTORALES PRECOLOMBINOS, HALLADOS EN LA VEREDA DE TAJUMBINA MUNICIPIO DE LA CRUZ (NARIÑO-COLOMBIA).

**D. J. Gómez <sup>(1)</sup>, J. A. Escobar <sup>(2)</sup>**

(1) Departamento Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes, COLOMBIA.

(2) Departamento Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes.

E-mail (autor de contacto): [dj.gomez27@uniandes.edu.co](mailto:dj.gomez27@uniandes.edu.co)

### RESUMEN

*La metalurgia precolombina suramericana tuvo un desarrollo enfocado en la simbología religiosa, el estatus social y el poder político. De acuerdo a los estudios realizados, se cree que los objetos que se fabricaban no solo poseían un significado debido a su forma sino también a su color. Para darle estas características de color, algunos objetos fueron hechos a partir de aleaciones de Au-Ag-Cu. Esta investigación buscó desarrollar protocolos de caracterización de piezas metalúrgicas precolombinas, utilizando muestras de las zonas del sur de Colombia que se cree están recubiertos por la técnica de dorado por oxidación. Estas fueron recuperadas de una tumba en el municipio de Tajumbina ubicado en el departamento de Nariño al sur de Colombia y fueron facilitadas por El Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH). Para caracterizar las muestras se utilizaron técnicas de microscopía óptica (MO) combinada con micro dureza, microscopía electrónica de barrido (SEM), difracción de rayos X (DRX), y espectroscopía por fluorescencia de rayos X (WDXRF). A través de estas técnicas se buscó estudiar la composición química, las microestructuras, el espesor del recubrimiento. Para ajustar los protocolos de caracterización se utilizaron muestras hechas en aleaciones Ag-Cu, fabricadas a partir de procesos de replicación<sup>1</sup>. Los análisis de composición química sobre las muestras de Tajumbina demostraron que las aleaciones en las que estaban hechas las muestras contenían como elemento mayoritario al Cu en porcentajes superiores al 70 %wt, y que los recubrimientos están compuestos por Au y/o Ag. Los resultados de los patrones de DRX de las muestras de control, en conjunto con los obtenidos por MO y SEM de las mismas, fueron comparados con los resultados obtenidos utilizando las mismas técnicas sobre las muestras precolombinas, obteniendo así una caracterización de la microestructura, las fases presentes y el tipo de recubrimiento que estas tenían. Como resultado general se logró montar una serie de técnicas y metodologías, para hacer un apropiado análisis del tipo de recubrimiento y aleación base en esta clase de muestra, además se llegó a la conclusión de que los pectorales fueron fabricados a partir de martillado en caliente utilizando diferentes materias primas (aleaciones naturales de Ag-Au-Cu), unas ricas en Cu y otras ricas en Au, y recubiertos por medio de la técnica de dorado por oxidación.*

### Tópico 2: Materiales Metálicos

**Palabras clave:** Arqueometalurgia, Caracterización, Piezas precolombinas, Tumbaga, Dorado por oxidación.

### 1. INTRODUCCIÓN

La metalurgia de las culturas indígenas precolombinas de Suramérica, se desarrolló completamente aparte a la del viejo continente; motivada no por la guerra, ni el transporte, ni la agricultura, sino por el poder político, el estatus social, y las creencias religiosas. [1,2]. Esta metalurgia, llamada “la metalurgia de la comunicación” es

---

<sup>1</sup> Se reprodujo de manera artesanal el proceso de dorado / plateado por oxidación realizado por los orfebres indígenas utilizando aleaciones Ag-Cu.

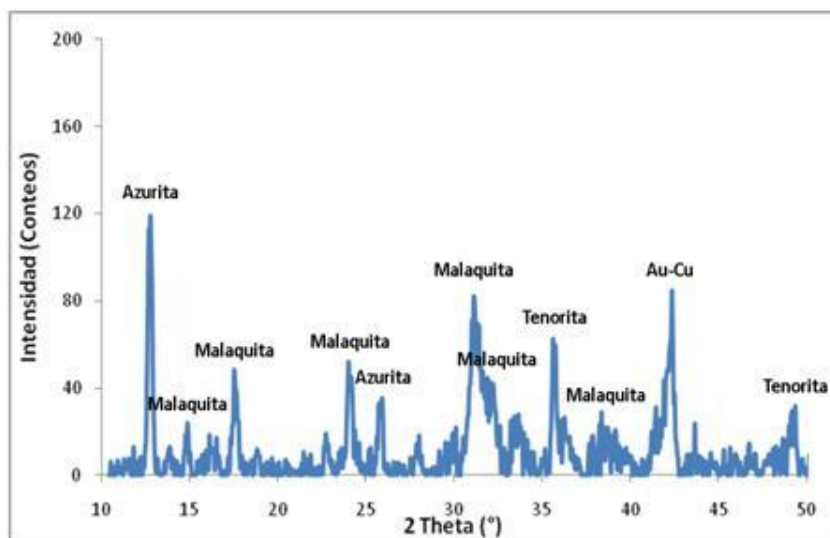
un arte religioso que no puede ser comprendido y apreciado sin poseer algún conocimiento de las tradiciones religiosas que la motivaron. Se desarrolló para obtener objetos que encerraban significados no sólo por su forma, sino también de acuerdo con los materiales utilizados para fabricarlos. Las propiedades particulares de estos materiales fueron importantes para la comunicación establecida, entre éstas la más significativa fue el color [3]. En la zona andina de Perú, Bolivia, Colombia y Ecuador, los dos colores predominantes eran los generados por Au y Ag. Los orfebres eran capaces de recubrir los objetos con capas de un fino espesor de oro y/o plata [2]), obtenidos a partir de aleaciones Ag-Cu, Au-Ag-Cu (Tumbaga, [3]), e incluso la aleación entre Au-Pt (utilizada en Ecuador y Colombia). Estas aleaciones tuvieron un desarrollo temprano y se utilizaron durante todo el periodo precolombino. Para los indígenas precolombinos suramericanos, el oro y la plata estaban dotados de un significado espiritual y simbólico. Estaban asociados a poder mundano, estatus y riqueza. Las técnicas que estos utilizaban para generar estas capas se conocen como dorados o plateados, y fueron comunes en las regiones del sur de Colombia, norte de Perú y norte de Ecuador. Estas técnicas pueden ser divididas en dos grandes categorías: 1) dorado o plateado con lámina o por fusión en la que depositan o adhieren una capa superficial de oro o plata en el substrato metálico, y 2) dorado o plateado por oxidación en la que los metales menos nobles en las aleaciones son oxidados y posteriormente removidos (Depletion Gilding / Plating), revelando la superficie con una capa de oro y/o plata porosa; esta técnica es viable solo en aleaciones que contengan oro o plata de manera a priori en la aleación.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El estudio y caracterización se realizó primero sobre muestras fabricadas en el laboratorio, de aleaciones de cobre y plata, con composiciones 70%Cu-30%Ag, 80%Cu-20%Ag y 90% Cu -10% Ag, recubiertas con una capa enriquecida en plata, por medio de la replicación del proceso de plateado por oxidación. Los recubrimientos sobre estas aleaciones se generaron a partir, de procesos de plateado por oxidación llevados a cabo en un horno a una temperatura de 600°C, en periodos interrumpidos de 3min, estos procesos se llevaron a cabo 12 veces para la aleación 70-30, y 15 veces para las 80-20 y 90-10. A partir de la experimentación con éstas muestras, se montaron las técnicas y bases para, la caracterización y estudio de las muestras precolombinas. Las muestras precolombinas analizadas durante el desarrollo de la investigación, fueron 6 fragmentos pertenecientes a 3 pectorales de tumbaga, recubiertos con una capa de oro fabricada por el método de dorado por oxidación, hallados en una tumba de la vereda de Tajumbina, municipio de La Cruz, Nariño, Colombia. Dependiendo del pectoral las muestras se designaron como A, B, y C. Las muestras se caracterizaron por medio de las técnicas de microscopía óptica (MO), microscopía electrónica de barrido (MEB), difracción de rayos X (DRX), y espectroscopía por fluorescencia de rayos X por longitud de onda dispersiva (WDFRX). A través de estas se estudió la composición química, las microestructuras, los patrones de difracción, el espesor del recubrimiento; y con su análisis proponer posibles métodos de manufactura y recubrimiento realizados por sus fabricantes. Los equipos utilizados para la realización de los análisis de composición química, fueron un EDS / SEM FEI Quanta 200, y un WDXRF Rigaku ZSX Primus I con un tubo de ánodo de Rh y una potencia de 4 kW. Los análisis por DRX se llevaron a cabo en un equipo Rigaku Ultima III con un tubo de ánodo de cobre y una potencia de 1.6 kW, en configuraciones de difractómetro de polvos con geometría Bragg Brentano para analizar las aleaciones base, y en configuración de análisis de películas delgadas por haz paralelo para analizar los recubrimientos. Los análisis metalográficos y de espesor del recubrimiento se llevaron a cabo con un microscopio óptico y el software de análisis de imagen, Analysis 5 de Olympus, y un MEB FEI Quanta 200.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez fueron montadas las técnicas y los equipos fueron puestos a punto utilizando las muestras replicadas, se procedió a someter las muestras precolombinas a los análisis. Un análisis por DRX, permitió obtener una identificación acerca de los posibles óxidos que se encuentran en la superficie de las muestras. En la Figura 1 se pueden observar los resultados obtenidos, sobre el patrón de DRX desde un ángulo de 20° hasta 45° en 2 Theta.



**Figura 1.** Análisis del patrón de DRX del óxido presente en la superficie de las muestras.

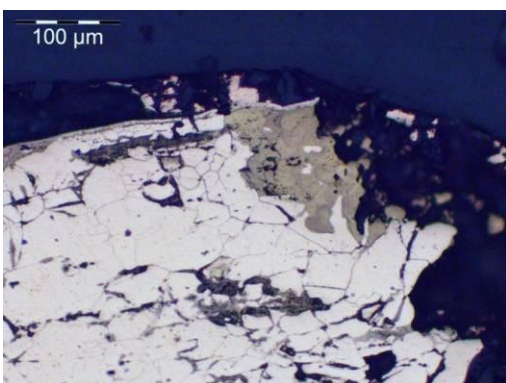
La forma y ancho de los picos, dan señales de la ocurrencia de solapamiento entre fases presentes, observando las posiciones de los picos de mayor intensidad relativa, para los diferentes óxidos posibles, se puede ver como estos concuerdan con la forma, y la posición de los picos debido al solapamiento. Los posibles óxidos identificados en la superficie después de comparar con las bases de datos PDF2 son: Malaquita, Tenorita, Azurita, Óxido de Cobre ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), y un compuesto intermetálico Au-Cu.

Los fragmentos observados en la Figura 2 fueron sujetos a análisis por DRX, WDFRX, MO/MEB y micro sonda EDS.

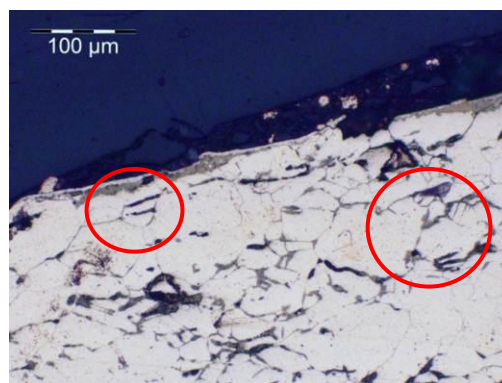


**Figura 2.** Fragmentos utilizados, para realizar la caracterización de los recubrimientos y las aleaciones base de los pectorales.

Durante un análisis metalográfico (ver Figura 3) se observaron zonas dentro del fragmento, donde hay una clara segregación de un material más oscuro. El avanzado estado de corrosión intergranular y transgranular, y la presencia de algunas zonas donde se aprecia el recubrimiento con agrietamientos inducidos por corrosión, es apreciable en las micrografías ver Figura 3 y Figura 4. Este avanzado estado de corrosión es el responsable de la extrema fragilidad de las muestras. Este estado (proceso de corrosión sufrido por aleaciones de tumbaga recubiertas por medio de la técnica de dorado por oxidación), se debe a la interacción con el suelo del sitio de donde fueron las muestras excavadas (ácidos ricos en cloruros, sulfuros, y contaminantes carbonosos) y a la naturaleza galvánica resultado de su composición química -el suelo (electrólito) y las muestras conforman la celda galvánica-. En la Figura 4, encerradas en círculos rojos se observan líneas de maclas de recocido delineadas por la corrosión, las cuales son una señal de que la pieza sufrió algún tipo de trabajo en frío que generó una deformación plástica durante su manufactura, [4,5], esto junto con la existencia de granos (delineados por las grietas intergranulares), son una clara señal de que la pieza pasó por uno varios procesos de recocido durante su fabricación, que generó el crecimiento de los granos y se utilizó para aliviar los esfuerzos residuales del proceso de trabajo en frío.



**Figura 3.** Micrografía sin ataque del fragmento A, 200X.

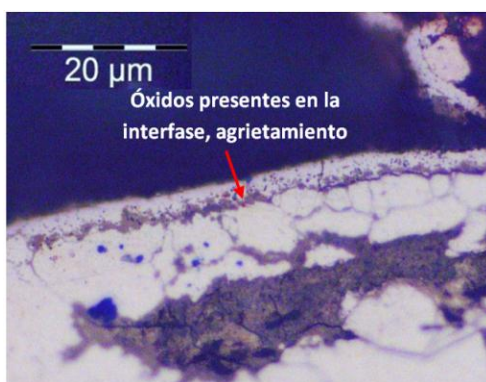


**Figura 4.** Micrografía sin ataque del fragmento A, 200X. En rojo están demarcadas las maclas de recocido delineadas por la corrosión.

Realizando una observación en los bordes de la muestra se puede ver que el recubrimiento es poroso, este fenómeno es característico de la técnica de dorado por oxidación, como lo reportan los estudios realizados por Scott [4,6], Lechtman [7,8], Grimwade [9] y Meeks [10], entre otros, y es consecuencia del carácter difusivo de la corrosión que se genera durante el proceso de oxidación del cobre superficial. En la Figura 5 se puede apreciar con un mayor aumento el recubrimiento, se puede observar corrosión en la aleación base y la presencia de óxidos en la interfase del recubrimiento. De acuerdo a lo reportado por la referencia [11], este óxido es Cuprita, más adelante en la sección de MEB/EDS se realizó un análisis de composición química por microsonda (EDS). En la Tabla 1, se encuentra el valor promedio del espesor del recubrimiento.

**Tabla 1.** Espesor promedio del recubrimiento del fragmento de pectoral de la tumba de Tajumbina.

Aleación	Máximo (µm)	Mínimo (µm)	Promedio (µm)	Desviación std. (µm)
Tumbaga	7.89	4.12	5.51	1.11



**Figura 5.** Micrografía sin ataque del fragmento A, 1000X. Se ve la corrosión intergranular, transgranular el recubrimiento, el óxido presente en la interfase del recubrimiento y el agrietamiento generado por esto que hace que el dorado se desprenda.

Por medio de análisis de composición química por (EDS) realizado a 25 kV, se determinó la composición en las zonas de segregación A, B, y C, ver Figura 6. En la Tabla 2 se encuentran los valores de composición obtenidos para estas segregaciones. Estas segregaciones están compuestas principalmente por Au, una hipótesis del por qué se encuentran estas segregaciones radica en el proceso de manufactura del pectoral, y las materias primas utilizadas para fabricarlo. Existen dos posibilidades, la primera consiste en fundir la aleación base rica en Cu y agregar pequeñas cantidades de Au nativo a la misma, este Au nativo, al tener una temperatura de fusión

superior quedó rodeado por la aleación base. La segunda posibilidad consiste en que el pectoral haya sido fabricado a partir de la sinterización de varios fragmentos de aleaciones naturales y oro nativo, por medio de un proceso de martillado en caliente y un recocido posterior generando difusión en estado sólido entre los fragmentos. Alrededor de las fronteras de los granos, se pueden observar precipitados de color claro, compuestos principalmente de Au; ver

Tabla 3.

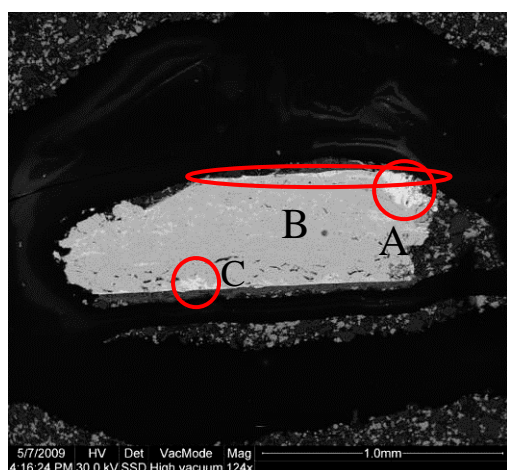
**Tabla 2** Composición química por EDS a 25 kV, de las zonas segregadas dentro del fragmento.

Segregación	Ag(L) wt%	Cu(K) wt%	Au(L) wt%
A	6.14	5.64	88.22
B	5.49	4.77	89.74
C	4.49	15.78	79.73
Promedio	5.37	8.73	85.90

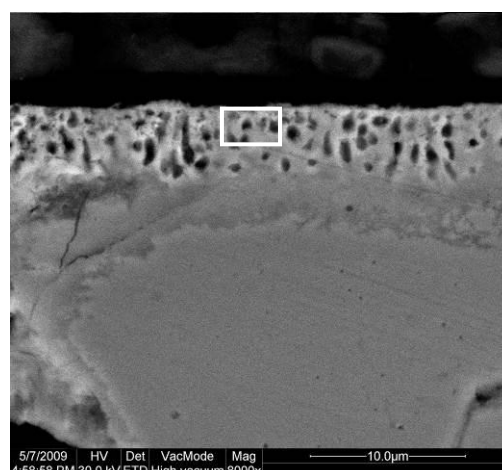
**Tabla 3.** Composición química por EDS a 25 kV, de los precipitados que rodean las fronteras de grano.

	Ag(L) wt%	Cu(K) wt%	Au(L) wt%
Precipitados	5.29	17.31	77.40

La imagen obtenida a través del detector de electrones secundarios (ETD), (ver Figura 7), permite observar la porosidad del recubrimiento característica del proceso de dorado por oxidación. Los resultados de la composición química del recubrimiento y la aleación base del fragmento de pectoral de la tumba de Tajumbina, se encuentran en la Tabla 4.



**Figura 6.** Imagen donde se ve por completo el corte transversal del fragmento de pectoral, tomada por detector de electrones retro dispersos SSD, 124X.



**Figura 7.** Imagen donde se puede apreciar por detector de electrones secundarios (ETD), la topografía del recubrimiento poroso, el recuadro blanco demarca la zona de análisis para composición del recubrimiento; 8000X.

**Tabla 4.** Composición química por microsonda EDS de la aleación base y el recubrimiento del fragmento de Tajumbina.

Zona	Ag(L)	Cu(K)	Au(L)
	wt %	wt %	wt %
Recubrimiento	1.14	33.58	65.28
Aleación base	2.85	53.73	43.42

La composición de la aleación base (ver Tabla 4) concuerda con la de una tumbaga precolombina, referencias [12-14]. Esto puede ser un indicio de que las aleaciones no eran fabricadas por los indígenas, sino que naturalmente las obtenían con estas composiciones, ya fueran pepitas de aluvión o a partir de la extracción de las mismas de minerales o de menas [15]. De acuerdo a la composición química del fragmento estudiado, la

temperatura de fusión según el diagrama de fases ternario es de aproximadamente 950°C, y para las segregaciones ricas en Au es de 1050°C. De acuerdo a lo reportado en la literatura [15-17], los indígenas lograban alcanzar temperaturas lo suficientemente altas, como para fundir la aleación base y las segregaciones, es decir que si el pectoral hubiera sido fabricado a partir de un lingote fundido, no deberían aparecer estas segregaciones ya que todo se habría mezclado homogéneamente y quedarían algunas huellas del proceso como dendritas disfrazadas. Retomando las hipótesis de fabricación del pectoral propuestas en la sección anterior, la presencia de las segregaciones nos permite descartar un proceso de fundición de las aleaciones, ya que de haber alcanzado la temperatura de fusión no existirían estas segregaciones y se podrían observar características típicas de un proceso de solidificación. La mejor hipótesis de cómo se fabricó el pectoral, es la que involucra un proceso de martillado en caliente de fragmentos de las materias primas utilizadas, generando una unión entre estos debido a la difusión entre los materiales (sinterización) hasta darle la forma final al material, esto explicaría la presencia de las segregaciones. Al comparar los resultados obtenidos (recubrimiento / aleación base), se aprecia que el recubrimiento contiene una mayor concentración de Au, es decir, sufrió el enriquecimiento superficial característico de la técnica de dorado por oxidación. Es conveniente en una futura investigación realizar una replicación con aleaciones Au-Cu, y Au puro para verificar esta hipótesis

Para determinar e; tipo de compuesto presente en la interfase entre el recubrimiento y el sustrato, se realizó un análisis por EDS sobre esta. La composición química obtenida revela la presencia de O<sub>2</sub> y Cu, tomando como referencia a Scott [11], típicamente se espera que este óxido sea Cuprita.

**Tabla 5.** Composición química obtenida por medio de EDS 25 kV del óxido presente en la interfase.

Zona	O(K) wt %	Cu(K) wt %
<b>Interfase</b>	11.00	89.00

La composición de la aleación base por medio de WDFRX, de las muestras se encuentra en la Tabla 6, y en la Tabla 7, se encuentran los valores de la composición del recubrimiento por WDFRX.

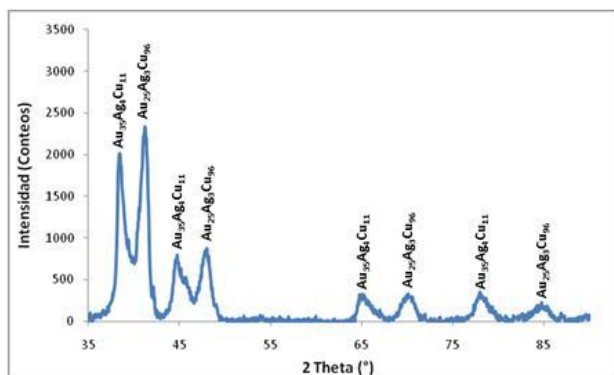
**Tabla 6.** Composición química por WDFRX de la aleación base, solo metales preciosos.

	Cu	Ag	Au
	wt%	wt%	wt%
<b>Matriz de la aleación</b>	61.73	4.81	33.16
	60.77	4.65	33.19
	60.77	4.65	33.19
<b>Promedio</b>	61.09	4.70	33.18

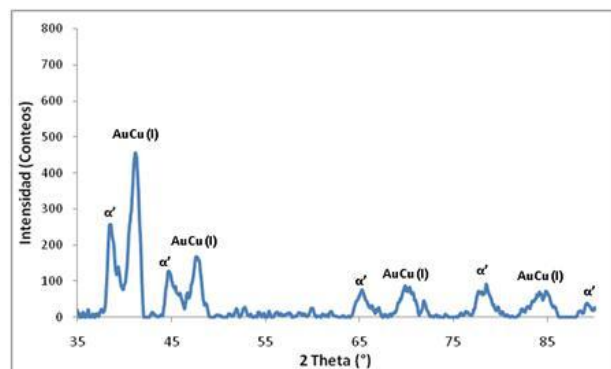
**Tabla 7.** Composición química de los metales preciosos del recubrimiento por WDFRX.

	Cu	Ag	Au
	wt%	wt%	wt%
<b>Recubrimiento tumbaga</b>	21,30	8,64	69,59
	20,56	7,89	69,40
	21,57	8,32	69,34
<b>Promedio</b>	21,14	8,28	69,44

Para complementar los resultados se realizó una caracterización cristalográfica y una determinación de la fórmula de las aleaciones por medio de estequiometría a partir de las composiciones químicas obtenidas por WDFRX. De acuerdo al diagrama de fases para las aleaciones Ag-Au-Cu [18], y a las composiciones químicas obtenidas, la aleación del pectoral (la tumbaga) debería estar compuesta solo, por una fase ( $\alpha'$ ) rica en Ag y el compuesto intermetálico AuCu<sub>3</sub>, no obstante como se observó a través de las micrografías obtenidas por MO y MEB, que dentro del fragmento hay zonas con segregaciones de fases ricas en Au y fases ricas en Au precipitadas alrededor de las fronteras de grano, en ambos casos la concentración de Au > 75. Por diagrama de fases de acuerdo a las concentraciones determinadas por los análisis de composición química por EDS los compuestos intermetálicos esperados serían Au<sub>35</sub>Ag<sub>4</sub>Cu<sub>11</sub> para los precipitados y segregaciones de Au, y Au<sub>25</sub>Ag<sub>3</sub>Cu<sub>96</sub> para la matriz rica en Cu. En el patrón de DRX del recubrimiento se puede observar en la Figura 9. De acuerdo a la composición química (ver Tabla 7) y el diagrama de fases, el recubrimiento debería estar compuesto por una fase ( $\alpha'$ ) rica en Ag y el compuesto intermetálico AuCu (I). Este patrón fue obtenido a través de una medición de película delgada a un ángulo rasante de 2°.



**Figura 8.** Patrón de DRX de las fases presentes en la aleación base del fragmento de pectoral.



**Figura 9.** Patrón de DRX de las fases presentes en el recubrimiento del pectoral.

Un análisis de indexación de los picos característicos para cada compuesto, permitió determinar el tipo de estructura cristalina y calcular los parámetros de red de la celda de los compuestos intermetálicos, de las segregaciones y fases ricas en Au. Los resultados se encuentran en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Estructura cristalina, parámetros de red y volumen de celda calculados para los compuestos intermetálicos presentes en la matriz del fragmento de pectoral.

Compuesto	Estructura cristalina	Parámetros de red[Å] (desv.Est)	Volumen de celda [Å <sup>3</sup> ]
<b>Au25Ag3Cu96</b>	Cúbica Fm $\bar{3}$ m (225)	3.79857 (0.000384)	54.81
<b>Au35Ag4Cu11</b>	Cúbica Fm $\bar{3}$ m (225)	4.08733 (0.001108)	68.28

Los compuestos intermetálicos cristalizaron en estructuras cúbicas centradas en las caras con grupo espacial Fm $\bar{3}$ m (225). Continuaron con el tipo de estructura cristalina original que poseen por naturaleza los elementos puros (Au, Ag, Cu).

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de las muestras precolombinas, por medio de las técnicas de caracterización utilizadas, dejan ver que los protocolos implementados con base en las réplicas de Cu-Ag, son aplicables completamente en la evaluación de muestras arqueológicas hechas de tumbaga.

El fragmento de pectoral preparado metalográficamente estudiado está hecho de tumbaga, fue recubierto por un proceso de dorado por oxidación, se fabricó por medio de procesos de trabajo en frío (posiblemente martillado), y en su última etapa fue sometido a un proceso de recocido

#### REFERENCIAS

1. Techniques of gilding and surface-enrichment in prehispanic American metallurgy. Bray, Warwick. 1993, En Metal plating and patination : cultural, technical, and historical developments, de Susan La Niece y P T Craddock. Oxford.
2. Pre-Columbian Surface Metallurgy. Lechtman, Heather. 1984b, Scientific American , pp. 250 (6):56-63.
3. Perspectivas de la metalurgia precolombina de las Américas. Lechtman, H. 1985. Metalurgia de la América precolombina, 45° Congreso Internacional de Americanistas. pp. 19-36.
4. Scott, David A. Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals. Singapore: Tien Wah Press, Ltd., 1991.
5. Smith, William F. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. Madrid: McGRAW- HILL INTERAMERICANA DE ESPAÑA, 1998. 84-481-1429-9.

6. Gold and Silver Coatings Over Copper: An Examination of Some Artifacts From Ecuador and Colombia. Scott, D. 1986a, *Archaeometry*, pp. 28: 33-50.
7. Ancient Methods of Gilding Silver: Examples from the Old and the New Worlds. Lechtman, Heather N. [ed.] Robert H. Brill (ed.). 30, s.l.: Cambridge: MIT Press., *Science and Archaeology*, Vol. 2.
8. New Perspectives on Moche Metallurgy: Techniques of Gilding Copper at Loma Negra, Northern Peru. Heather Lechtman, Antonieta Erlij, Edward J. Barry, Jr. 1, Enero 1982, *American Antiquity*, Vol. 47, pp. 3-30.
9. The Surface Enrichment of Carat Gold Alloys - Depletion Gilding. Grimwade, Mark. 1999, *Gold Technology*, Issue 26.
10. Meeks, Nigel. Página web de la Biblioteca Luis Ángel Arango del Banco de la República. [Online] Mayo 27, 2005. [Cited: Enero 24, 2009.] <http://www.lablaa.org/blaavirtual/publicacionesbanrep/bolmuseo/1998/endi4445/endi03f.htm>.
11. The Deterioration of Gold Alloys and Some Aspects of Their Conservation. Scott, David A. 4, 1983, *Studies in Conservation*, Vol. 28, pp. 194-203.
12. The metallurgy and technology of gold and platinum among the Pre-Columbian Indians. Bergsøe, Paul. 1937, *Ingeniørvidenskabelige Skrifter*, p. A44.
13. The deterioration of gold alloys and some aspects of their conservation. Scott, D. 1983a, *Studies in Conservation*, pp. 28, 194-203.
14. Metallurgical Case Studies From The British Museum's Collections of Pre-Hispanic Gold. Niece, Susan LA. 44-45, 1998, *Boletín Museo del Oro*.
15. Alunni, Antonella I. A Study Investigating Copper Smelting Remains From San Bartolo, Chile. [Tesis de grado en ciencia e ingeniería de materiales MIT]. 2006. Tesis de Grado en Ciencia e ingeniería de materiales.
16. The gilding process and the metallurgy of copper and lead among the Pre-Columbian Indians. Bergsøe, Paul. 1938, *Ingeniørvidenskabelige Skrifter*, p. A46.
17. Lechtman, Heather. Traditions and Styles in Central Andean Metalworking. [book auth.] Editado por Robert Maddin. *The Beginning of the Use of Metals and Alloys*. Massachusetts: MIT Press, 1988.
18. Alan Prince†, actualizado por Tamara Velikanova and Mikhail Turchanin. Silver – Gold – Copper. [book auth.] MSIT Materials Science and International Team. Ternary Alloy Systems Phase Diagrams, Crystallographic and Thermodynamic Data. Stuttgart: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.