



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE QUÍMICA**

**METALURGIA EN MESOAMÉRICA: DIOSES, BRILLO, COLORES  
Y SONIDOS**

*TESIS DE LICENCIATURA*

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**PRESENTA  
LUIS MIGUEL URBINA LEONOR**



**MÉXICO, D.F.**

**AÑO 2014**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Profesor: Guillermo Fausto Salas Banuet.

**VOCAL:** Profesor: José Alejandro García Hinojosa.

**SECRETARIO:** Profesor: Balbina Ojeda Ramírez.

**1er. SUPLENTE:** Profesor: Juan Manuel de la Rosa Canales.

**2° SUPLENTE:** Profesor: José Guadalupe Ramírez Vieyra.

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: EDIFICIO D, FACULTAD DE QUÍMICA,  
UNAM, CU, MÉXICO, D.F.**

**ASESOR DEL TEMA:**

**Guillermo Fausto Salas Banuet**

**SUPERVISOR TÉCNICO:**

**José Guadalupe Ramírez Vieyra**

**SUSTENTANTE (S):**

**Luis Miguel Urbina Leonor**

## Metalurgia en Mesoamérica: dioses, brillo, colores y sonidos.

Índice	3
1. Resumen	4
2. Introducción.	5
3. Objetivos, preguntas de investigación e hipótesis.	7
4. Marco Teórico.	9
3.1 Color y brillo.	19
3.2 Sonido.	20
5. Experimentación.	22
6. Resultados.	24
7. Discusión de resultados.	28
6.1 Microestructura.	28
6.1.1 Bronces Cobre-Estaño.	28
6.1.2 Bronces Cobre-Plomo.	30
6.2 Rapidez de solidificación.	31
6.3 Color (RGB).	31
6.4 Brillo (HSB).	35
6.5 Sonido.	39
6.5.1 Infrasonido y Ultrasonido.	42
8. Observaciones Importantes.	45
8.1. Inferencias.	46
9. Conclusiones.	48
10. Bibliografía.	50
Anexo I. Preparación Metalográfica.	52

## Metalurgia en Mesoamérica: dioses, brillos, colores y sonidos.

---

### 1. Resumen

En la Mesoamérica prehispánica se fabricaron principalmente aleaciones de cobre, oro y plata. Para comprender el porqué de su fabricación, es necesario saber cuáles eran los comportamientos valorados por esa sociedad. Estos comportamientos han sido propuestos (color, brillo y sonido). Se buscó relacionar esos comportamientos con la cosmovisión mesoamericana midiendo propiedades no comúnmente valoradas en metalurgia moderna. En la hierofánica cultura mesoamericana dichos comportamientos eran necesarios para acercar a los participantes, mediante el uso de objetos metálicos en diversos rituales, a sus dioses.

Para ello se recrearon algunas aleaciones base cobre halladas (bronces al plomo y al estaño) y se midieron color, brillo y sonido. También se modificó el espaciamiento dendrítico secundario (EDS) y obtuvo una correlación directa con el brillo, además de diversas tendencias y correlaciones entre el color y el contenido de elemento aleante.

El color, el brillo y el sonido fueron modificados por los purépechas al aumentar o disminuir la composición química de la aleación. El brillo también lo afectaban al variar el EDS. El color y el sonido (este último también valorado por los mexicas), casi exclusivamente variando el contenido de elemento aleante.

Se concluyó que las aleaciones Cobre-Estaño se fabricaban con la intención de simular el color del amanecer, del oro, del sol y la luna, del maíz y del ocaso, dependiendo el contenido de elemento aleante.

Se halló la presencia de infrasonido en la mayor parte de las aleaciones con las que se fabricaban cascabeles, lo que es importante debido a que el infrasonido ha estado relacionado directamente con la alteración de comportamiento en seres

humanos, produciéndoles miedo; también se halló ultrasonido pero no se sabe el efecto que tiene en los seres humanos.

## **2. Introducción**

En la presente tesis se busca hallar correlaciones entre propiedades y diversas variables estructurales o químicas de algunas aleaciones utilizadas en Mesoamérica, además de relacionar esas propiedades y variables con los comportamientos perseguidos por los metalurgistas mesoamericanos, con los objetos fabricados con ellas y con los mitos y ritos que su cosmogonía implicaba.

El acercamiento a la comprensión de la cultura mesoamericana ha sido muy amplio desde las primeras hipótesis (Kirchoff, 1947), en las que se identificó una gran cantidad de civilizaciones como una sola cultura. Actualmente se busca observar, comentar y comprender la evidencia de las diversas fuentes (oral, documental, arqueológica). De esta manera y aunque de forma aventurada, se ha logrado un acercamiento menos evidente pero a la vez más empático desde nuestra cultura occidental posmodernista a la cultura que habitó el área mesoamericana.

En este ámbito, la tecnología juega un papel importante: el avance tecnológico alcanzado por las civilizaciones mesoamericanas fue muy amplio y diverso. La metalurgia no fue la excepción; sin embargo, existe la tesis de que las propiedades de las aleaciones importantes para dichas civilizaciones no son las buscadas en la actualidad, por lo que algunas investigaciones se han enfocado en proponer propiedades y comportamientos eran relevantes en esa sociedad. Para comprender los comportamientos buscados en el área mesoamericana es indispensable observar qué objetos se fabricaban con cuáles metales o aleaciones y medir sus propiedades. El presente trabajo surgió debido a que se ha observado un interés continuo en ciertos comportamientos de los objetos mesoamericanos; Lechtam (1981) y Hosler (2005) coinciden en que son el color y el sonido y Salas *et al* (2001; 2006) agregan el brillo. Además, los metales presentan un comportamiento muy distinto al resto de los objetos presentes en la naturaleza:

tienen color y brillo llamativo, adquieren la forma deseada, por fundición; presentan facilidad para deformarse en condiciones particulares y cumplen su función estética y mecánica satisfactoriamente, pueden presentar sonidos característicos, entre otros. En resumen, se trata de un tipo de material con comportamientos únicos. Salas *et al* (2001; 2006; 2012) mencionan que los metales tienen comportamientos distintos a los materiales usados hasta entonces; principalmente cerámica, caliza, obsidiana y minerales preciosos o semipreciosos: el color, el brillo y el sonido son los más evidentes y a los que más valor se le dio en ese momento. Esto provocó que, a lo largo de la historia, este tipo de material fuera asociado con lo divino en muchas civilizaciones (Salas, Ramírez, Noguez, 2001; 2006; Cockrel y Salas, 2012; Lechtam, 1981; Hosler, 2005).

El desarrollo de nuevas tecnologías y materiales se ha observado como un impulso esencial para la hegemonía política y cultural de quienes las poseen a lo largo de la historia del mundo; ejemplos de esto hay desde los hititas con el hierro hasta la Posmodernidad. Sin embargo, cada cultura tiene una manera distinta de demostrar esta hegemonía. Algunos, mediante la esclavitud de los vencidos, otros mediante su anexión como tributarios, o bien imponiendo algún aspecto de su cultura (religión, estructura, tecnología). Los incas, por ejemplo, en cuanto conquistaban alguna cultura o pueblo, sustituían la aleación Cu-As, usada ampliamente en Sudamérica, por la aleación Cu-Sn. Debido a la incidencia y emplazamiento de los depósitos de casiterita (SnO), se observa que no se trata de una sustitución tecnológica, sino de corte político (Hosler, 2005). Mesoamérica no es la excepción. Sin embargo, como se ha discutido en investigaciones previas (Hosler, 2005), la metalurgia comenzó a ser utilizada en un contexto diferente: no fue motor de innovaciones tecnológicas de amplia repercusión (Lull y Fernández Manzano, 1998) sino más bien un acercamiento de las culturas a sus deidades. Sin embargo, técnicamente (es decir, la manera en la que estos materiales fueron procesados) el inicio fue un proceso similar, usando metales nativos.

La Arqueometalurgia se ha apoyado en la Arqueometría para cuantificar algunas propiedades. Se sabe que las propiedades de los materiales están relacionadas, entre otras cosas, con su microestructura. Entonces es necesario caracterizar y

cuantificar la microestructura presente en cada uno. En trabajos previos se han buscado y hallado algunas relaciones importantes entre parámetros de la Ciencia e Ingeniería de Materiales y dichas propiedades (Del Pilar, Fuentes, 2009).

### **3. Objetivos, preguntas de investigación e hipótesis**

#### *3.1 Objetivos*

En esta tesis se busca la explicación al uso de aleaciones localmente en algunas culturas de Mesoamérica: los tarascos, en el Occidente mesoamericano empleaban bronce al estaño: 5% (usada para fabricar cinceles, platos, bezotes, alambres, collares, buriles, hachas-moneda, puntas de lanza y flecha, bastones, mangos, cascos, aros, agujas, pinzas y cascabeles, entre otros); 12% (usada para manufacturar cascabeles, aros, pinzas, hachas moneda, bezotes, orejeras y narigueras); y 23% (utilizada principalmente para elaborar anillos); en el área mexicana, se empleaban bronce al plomo, con 2.4 y 4.2%, con las que se hacían cascabeles, orejeras, aros, anillos, agujas y espejos. Esta explicación se hará mediante su recreación, caracterización y estudio.

#### *3.2 Preguntas de investigación*

¿Qué comportamientos específicos buscaban los mesoamericanos al fabricar objetos con bronce de una composición química específica (principalmente cascabeles, debido a que el 85% de los objetos metálicos hallados son cascabeles)?

¿En cuáles aleaciones la microestructura interviene en la modificación del brillo, color o sonido?

¿Cuáles mitos explican los comportamientos buscados y los ritos usados por los mesoamericanos en el uso de artefactos metálicos?

### 3.3 Hipótesis

Los comportamientos buscados por los metalurgistas mesoamericanos en los objetos metálicos eran:

- distintos colores que recrearan algún cuerpo, objeto o fenómeno conocido, relacionados con mitos basados en el origen divino de los metales.
- un brillo que diferencie a los metales de los demás elementos y lo relacione con los brillos del sol y la luna (los dioses más importantes);
- un sonido particular en el uso de determinadas aleaciones (5% y 12% Sn, 2.4 y 4.3% Pb) para la fabricación de cascabeles que produce en quien lo percibe una alteración en el comportamiento (como facilitar el trance o infundir temor).

En la búsqueda de mejorar dichos comportamientos, los metalurgistas mesoamericanos alteraban expresamente algunas variables metalúrgicas (principalmente la composición química y la microestructura).

#### 4. Marco Teórico

Mesoamérica es un concepto cultural relativamente nuevo; actualmente se acepta que las civilizaciones que la habitaron pertenecieron a una sola superárea cultural (López Austin, 1989). Existen diferencias significativas (por ejemplo, en los cánones estéticos, las deidades principales, y hasta algunos rituales) aunque también compartían rasgos esenciales, como dioses y advocaciones de los mismos, ritos (como los sacrificios humanos, el juego de pelota, calendarios cívico y religioso, cinco puntos cardinales), estructura social (teocrática y dividida en grupos especializados en una actividad), gastronomía, relaciones comerciales y diplomáticas. Sin embargo, existen ritos particulares a cada una de estas culturas, debido a ligeras variaciones en los mitos: un ejemplo de ello es la cosmogonía, donde las fechas y el orden de los soles, inclusive cosas tan esenciales como la aniquilación total al final de una Era (Sol, en el argot mesoamericano) son diferentes. Para los mayas, esta aniquilación no fue total; para los mexicas sí (Séjourné, 2004). Inclusive se usan estas aniquilaciones parciales para justificar la diferencia entre civilizaciones (López Austin, 1989).

López Austin (1990) se encargó de enlistar las similitudes y diferencias en lo que él llama el “núcleo duro” de la cosmogonía de Mesoamérica; es decir, en la parte esencial de la misma.

Semejanzas:	Diferencias:
- Antecedentes históricos comunes.	- Medio geográfico.
- Mismo contexto histórico: intercambio cultural, comercial y político.	- Particularidades etnolingüísticas
- Existencia de predominio económico, político y cultural.	- Conformación histórica particular

	- Posiciones particulares de la sociedad ante creencias externas
	- Construcción de la identidad

Estas semejanzas y diferencias producen una cosmovisión ligeramente distinta, no excluyente sino particular, pero con significado común. Así, aunque los ritos particulares para adorar a un dios universal, como el de la lluvia o el del Sol, fueran distintos, su importancia era la misma. Un ejemplo de esta importancia universal es una “guerra” ritual que se llevaba a cabo cada cierto tiempo: la llamada “Guerra Florida”. Para evitar la ira divina desatada entre 1450 y 1454 (hubo una larga sequía, además de nevadas en invierno), los guerreros de la Triple Alianza (Texcoco, Tlacopan y Tenochtitlan) combatían con los de Huexotzinco, Tlaxcala y Cholula con el fin exclusivo de capturar prisioneros para poder sacrificarlos (Florescano Mayet, 1980).

Por lo tanto, el entendimiento de las culturas mesoamericanas implica la comprensión de sus mitos (López Austin, 2012; Malinowski, 1948), y el tener presente en todo momento que en ellas todo gira en torno a lo sagrado (Salas, Ramírez, Noguez, 2001; 2006; Cockrel y Salas, 2012). Cualquier cosa, cualquier momento y cualquier acción estaban condicionados por los dioses, por sus deseos, caprichos, animosidades y amistades. El hombre mesoamericano se sentía responsable de los dioses como un siervo: si su función se desempeñaba correctamente los dioses los ignorarían (y tal vez, en algunos casos excepcionales, premiarían) pero requerían permiso para todo y siempre debían estar agradecidos por el simple hecho de existir; si no desempeñaban su función existirían reprimendas. De tal suerte, su vestimenta, alimentación, los objetos que hacían e inclusive sus horarios estaban delimitados por sus creencias. Cada actividad y aspecto de la vida tenía una deidad responsable. López Austin (1989) escribe que el evemerismo (la deificación después de la muerte de una persona) es la explicación al aparentemente interminable panteón mesoamericano; así cualquier nueva actividad debía su patrono a su inventor, descubridor o a alguien que la mejorara; también de ahí surge el mito en que esta persona -posteriormente deificada- es quien hereda los instrumentos de trabajo a sus elegidos.

La sociedad mesoamericana estaba dividida en dos grandes clases: los *pípiltin* y sacerdotes, y los *macehualtin*. Cada una de las clases sociales cumplía las funciones que los dioses les habían asignado. Los *pípiltin* y los sacerdotes eran quienes tenían el poder (este poder no lo habían adquirido: los dioses los habían designado para ello): los nobles eran los únicos que podían gobernar, y tenían por lo tanto el poder político, mientras que los sacerdotes tenían acceso a los dioses, lo que les daba poder religioso. Sin embargo, el alcance de este poder cambiaba de acuerdo al rango del noble o sacerdote. Los *macehualtin* eran aquellos personajes que constituían el grueso de la población. Artesanos, agricultores, peones, cargadores, recolectores de basura, comerciantes, mercaderes viajeros, por ejemplo, pertenecían a esta clase, afortunada porque no tenían ni las pesadas obligaciones de gobernar ni eran esclavos; podían ser ricos o pobres. En los *altepeme* (ciudades mesoamericanas), la zona política, administrativa y religiosa estaba en el interior, mientras que cada barrio tenía trabajos especializados (aunque también practicaban la agricultura) con un dios, o grupo de dioses, que fungía como patrono (López Austin, 1989; Fernández Christlieb, 2006). A su vez, cada barrio tenía zonas administrativas y religiosas (Chávez Barragán, 2009). Las zonas religiosas eran de vital importancia para el desarrollo del barrio, pues en ellas se llevaban a cabo los ritos necesarios para la subsistencia del mismo; esto no ha cambiado en muchas comunidades del país, donde la fiesta del patrono es esencial para un buen año (López Austin, 1989).

Como se mencionó en la introducción, los metales tienen características que los hacen diferentes a cualquier otro tipo de objetos y ello solo podía deberse (en la cultura mesoamericana) a su origen divino. Esto se expresa claramente en el nombre náhuatl del oro (teocuítlatl), que significa “excremento de los dioses”: los mesoamericanos veían al oro como el desecho del Dios del Sol, Tonatiuh, debido al color; con la plata pasa algo similar, isteteocuítlatl, “excremento blanco de los dioses” (<http://aulex.org/es-nah/>), el desecho de la luna, Meztli. Para los Incas también tenían un origen divino: el oro era sudor del sol y la plata, lágrimas de la luna. Al provenir de los dioses, los metales debían ser usados para alabarlos o

dejar patente quienes eran sus elegidos mediante la alabanza, que podía ser el uso de objetos metálicos por un sacerdote o estatuilla en un rito particular (López Austin, 1989), o para alimentarlos (López Austin, 1990). Debido al carácter sagrado que prevalece en la alabanza, un sacerdote o “elegido” era quien generalmente celebraba estas ceremonias rituales.

Los dioses de la metalurgia a lo largo de la historia mundial han estado relacionados con el fuego, debido a que es necesario para su producción y facilita su procesamiento. Mesoamérica no fue la excepción: los dioses del fuego son siempre los dioses de la metalurgia, aunque debido a la compleja cosmogonía mesoamericana<sup>1</sup>, el mismo dios podía ser patrono del fuego, de la metalurgia y de la fertilidad, como es el caso de Xipe-Tótec. La relación entre metalurgia y fertilidad es una constante en la cosmovisión latinoamericana (López Austin, 1989).

La tecnología metalúrgica mesoamericana es entonces inherente a los rituales que se practicaban para la fabricación de piezas metálicas (este criterio en principio es aplicable a cualquier actividad que se desarrollara, pero solamente se tratará el caso puntual de la metalurgia); también lo es el uso que se les daba a dichos objetos, aunque es posible que hacia la llegada de los españoles, comenzaran a usarse objetos metálicos en medios seculares (debido a la fabricación de dagas y puntas de flechas, aunque no se sabe el uso que se les daba).

Sin embargo, se carece de información acerca de los rituales llevados a cabo para la producción metalúrgica. Es muy probable que la occisión ritual tuviera un papel importante en ella, lo que no ha sido mencionado en ningún texto de manera explícita. Se afirma esto porque los ritos usados para la adoración de los dioses relacionados con la fertilidad (Xipe Tótec, Tláloc, Chalchicuatlicue) incluían el sacrificio ya sea humano o animal y, debido al carácter sagrado de los metales, es muy probable que su producción incluyera una gran cantidad de ritos. Un ejemplo de esto es el ritual principal en honor a Xipe-Tótec, dios de la metalurgia y la fertilidad, el *Tlacaxipehualiztli* donde se desollaba al menos una persona (Bernardino de Sahagún: “A los cautivos que mataban arrancábanlos los cabellos

<sup>1</sup>Existe una explicación dada por López Austin (1989) en este aspecto: el dios tenía diversos aspectos porque en realidad originalmente era un título que llevaban los hombres elegidos por él, y estos hombres fueron quienes desarrollaron esta tecnología. 12

de la coronilla y guardábanlos los mismos amos, como reliquias; esto hacían en el calpulli delante del fuego”).

### ZONAS DE ACTIVIDAD METALÚRGICA EN EL MÉXICO MESOAMERICANO



Figura 1. Mapa de actividad metalúrgica en el México mesoamericano. Crédito de Salas, Noguez, Ramírez. En amarillo se observa la zona de Occidente; en rosa la zona Sur; en rojo la zona del Golfo; en verde la zona maya.

Salas, Noguez y Ramírez hicieron un mapa de zonas donde existió la actividad metalúrgica en Mesoamérica (Figura 1). Las aleaciones fabricadas en cada región se enumeran en las tablas 2 y 3.

<b>Tabla 2. Objetos, aleaciones y técnicas usadas en el Occidente mesoamericano</b>			
<b>Primera Etapa (600-1200 dC)</b>			
<b>Objetos</b>	<b>Metal</b>		<b>Técnica</b>
Cascabeles	Au, Ag, Cu	mayormente.	Fundición a la Cera Perdida
Anzuelos, punzones de dos puntas, pinzas, agujas, hachas.	Cu		Martillado en frío o caliente
Anillos de sección redonda y rectangular	Cu, Cu-As, Cu-Sn		Martillado en frío o caliente

Segunda Etapa (1200-1521 dC)		
Objetos	Metal	Técnica
Cinceles, platos, bezotes, alambres, azadas, azuela, sopletes, anzuelos, orejeras, narigueras, máscaras, vasos, collares, buriles, hachas-moneda, puntas de lanza y flecha, bastones, mangos, cascos.	Cu-(2-5) %Sn	Martillado en frío o caliente*
Cascabeles	Cu-(0.5-23) % As, Cu (0.5-13)% Sn	Fundición a la cera perdida
Aros gruesos	Cu	Martillado en frío o caliente*
Aros delgados	Cu-20% As, Cu-22% Sn, Cu (0.5-55)% Ag, Cu-4.76% As-1.13% Ag	Martillado en frío o caliente*
Pinzas	Cu, Cu-(2.5-12%) Sn, Cu-As-Sn, Cu-50% Ag, Cu-(2.7-4.4)% As	Martillado en frío o caliente*
Hachas-moneda	Cu-(0.5-6.3) % As, Cu-Sn	Martillado en frío o caliente*
Hachas	Cu, Cu-(0.8-8)% Sn, Cu-(0.7-5)% As, Cu-(1.3-5.3)% Sn-(1.3-5.3)% Ag	Martillado en frío o caliente*
Alambres	Cu-15% Zn	Martillado en frío o caliente*
Anillos de sección redonda y rectangular	Cu-Sn, Cu-Ag	Martillado en frío o caliente*

Escudos, pectorales, diademas, pendientes, gargantillas, aretes, discos, brazaletes.	Cu-(0-14)% Ag	Martillado en frío o caliente*
Punzones de una y dos puntas, aplanados	Cu-As, Cu-Sn, Cu-As-Sn	Martillado en frío o caliente*
Agujas (ojo perforado y doblado)	Cu- (1-2)% As, Cu-(11.8-13%) Sn	Martillado en frío o caliente*
Coas	Cu-(1.6-2.3)% As	Martillado en frío o caliente*

Crédito Noguez, Ramírez y Salas (2001).

\*El martillado en frío o caliente depende de la temperatura de fusión del metal o aleación que sea deformado; se refiere a que el cociente entre la temperatura de trabajo y la de fusión (Temperatura homóloga) sea mayor a 0.5 (caliente) o menor a 0.5 (frío). Se sabe si fue en frío o caliente debido a la forma de los granos: si se deforma en frío, existen granos alargados y aciculares; si es en caliente, los granos son más equiaxiales debido a que recristalizan, o se recuperan. Las dendritas si la deformación es en frío se elongan mientras que si es en caliente desaparecen. Cuando se martilla en frío, los planos compactos de la estructura cristalina (cúbica centrada en las caras) fluyen, mientras que si se trabaja en caliente, la estructura cristalina se puede recuperar fácilmente por la distancia atómica en la red.

<b>Tabla 3. Objetos, aleaciones y técnicas usadas en la zona centro de Mesoamérica</b>		
<b>Primera Etapa (600-1200 dC)</b>		
Sin Producción		
<b>Segunda Etapa (1200-1521 dC)</b>		
<b>Objetos* destacados</b>	<b>Metal</b>	<b>Técnica</b>
Cascabeles, orejeras.	Au, Ag, Cu, Pb, Cu-Pb.	Fundición a la Cera Perdida
Anillos, hachas, cinceles.	Cu-As, Cu-Sn, Cu-Pb.	Martillado en frío o caliente
Agujas	Ag-Au-Cu (tumbaga)	Martillado en frío o caliente
Polvo	Au	

\*Sin embargo, la producción de objetos fue muy variada. Crédito Noguez, Ramírez y Salas (2001)

Se observa que algunas culturas fabricaron únicamente ciertas aleaciones. Esta diferencia se debe al intercambio comercial llevado a cabo por los tarascos con Sudamérica, de donde obtenían el Estaño; también así se explica que los mexicas no tuvieran acceso al mismo ni a la tecnología de este tipo de bronce, pues este material era monopolizado por los tarascos debido a la rivalidad económica, política y militar entre ambas culturas.

Xipe era el dios de las culturas de Occidente; en la zona centro Cópil, representado con los atributos del dios de la metalurgia (López Austin, 1989) era quien probablemente después fue conocido como una de las advocaciones de Tezcatlipoca. Cabe resaltar que López Austin no hace la relación entre los hombres-dioses mexicas y Tezcatlipoca, que parece ser un dios al que le gustaban las adoraciones con metales (López Austin, 1989), producto probablemente a su nombre, “espejo humeante” (los espejos eran fabricados con aleaciones de Plomo como se puede apreciar en el Museo Nacional de Antropología) no solo en Mesoamérica, sino en otras culturas del mundo. Hablando de los mexicas, Alvarado Tezozómoc escribe, respecto a cualquier oficio y particularmente a la producción especializada de materiales que:

“...los mexicanos que ellos no lo sabían hacer, que no era su cargo ni oficio, sino conquistar, cortar pedernales, hacer navajas y enderezar varas para dardos y saetas, y esto era lo que por el momento aguardaban todas las gentes mexicanas... (López Austin, 1989, Pp. 177)”

Se puede afirmar entonces que no existían armas mexicas metálicas, aunque sí otros objetos metálicos. Por lo tanto, o bien los metales tenían un papel completamente sagrado para adorar a los dioses, o las armas fabricadas con madera y obsidiana cumplían los requerimientos de resistencia para la guerra. La probabilidad de ambas es la misma, e incluso pueden ser complementarias. Además, gracias a este párrafo también se infiere que los especialistas en metalurgia o no eran mexicas (lo más probable) o tenían una tradición incipiente. Tecnológicamente la complejidad de fabricar las aleaciones Cu-Pb (la familia preferida por los mexicas) y Cu-Sn (fabricada por los purépechas) es similar, debido al punto de fusión. Sin embargo la colabilidad y resistencia a la oxidación son mejores en la familia Cu-Sn.

Existe evidencia de que la metalurgia en Mesoamérica se desarrolló debido al intercambio comercial desde el sur de América, específicamente de dos tradiciones metalúrgicas distintas: la inca (bronces) y la de Centroamérica-Colombia (oro). Sin embargo, se sabe que no todos los objetos fueron introducidos a Mesoamérica por intercambio comercial, debido a la existencia de restos de hornos, escoria y objetos completamente distintos a los usados por las tradiciones antes mencionadas en sepulcros antiguos (Hosler, 2005). También se sabe que las aleaciones y la tecnología para fabricarlas fue importada: Cu-As y Cu-Sn son aleaciones utilizadas hacia las mismas épocas en Sudamérica. Dichas relaciones comerciales también quedan patentes por el difícil acceso a la casiterita en Mesoamérica y su difundido uso en Sudamérica para la fabricación de bronces al estaño, y al hallazgo en Sudamérica de la concha de un molusco endémico de la costa del Pacífico Mexicano (Hosler, 2005).

Es necesario mencionar el desarrollo que tuvo localmente la metalurgia en la zona mesoamericana. Hosler (2005) ha optado por separar dos etapas más o menos definidas debido a la fecha aproximada en que fueron fabricados algunos objetos metálicos y al material usado. En el primer periodo que abarca aproximadamente del 900-1200 dC se usó principalmente el cobre, mientras que en el segundo periodo, del 1200 hasta la llegada de los españoles, el uso de aleaciones predominó, sin dejar de usar el Cobre como materia prima. Esto se resume en las tablas 2 y 3, por región.

Puede observarse que los objetos fabricados en ambos periodos no son distintos (con la excepción de algunas dagas de uso incierto en la zona tarasca). El cobre y los metales nativos lograron un punto en su tecnología de fabricación en la que cualquier avance no era imposible sino más bien innecesario, pues se cumplían los requerimientos buscados, probablemente de sonido en los cascabeles, de brillo y color en los demás objetos rituales, e inclusive mecánicos (Hosler, 2005; Lechtman, 1981). Sin embargo, la introducción de las aleaciones fabricadas a propósito (ya sea Cu-Sn, fabricada con casiterita y calcopirita; o casiterita y cobre nativo; o Cu-As fabricado con arsenopirita y cobre nativo o calcopirita hacia el 1200 dC) produjo una revolución tecnológica: el endurecimiento del cobre por

medio de elementos de aleación fue el principal cambio, lo que permitió fabricar objetos de menor espesor que cumplieran las características (color, brillo y sonido) deseadas por los metalurgistas prehispánicos. Esto queda de manifiesto en que los objetos fabricados con algún metal o aleación según simulaciones cumplen su propósito sin fallar mecánicamente (Hosler, 2005). Los comportamientos de los objetos metálicos eran satisfactorios; sin embargo, la adición de elementos aleantes permitió un cambio perceptible en el color, lo que dio a los metalurgistas de esa época la posibilidad no solo experimentar hasta lograr un color más adecuado para llevar a cabo ritos, por el simbolismo que involucran, sino también mantener en límites razonables el comportamiento que era cumplido satisfactoriamente, e inclusive mejorarlo.

El reproducir el color de los materiales que se usaban para fabricar algunos objetos fue una inquietud que compartieron los metalurgistas en todo el mundo: los incas desarrollaron una técnica de dorado superficial; en diversas partes del mundo se fabricaron bronces con la finalidad de cambiar el color y mejorar la apariencia de los objetos producidos (y así complacer más a los dioses alabados) y también para ahorrar oro, que era escaso y caro; aún en la actualidad se aplican recubrimientos para cambiar la apariencia de los objetos. La importancia del brillo está relacionada con la del color: al ser utensilios que presentaban un comportamiento distinto (reflejar los rayos del dios del Sol), los sacerdotes y gobernantes tenían la intención de hacer patente la cercanía del usuario y los dioses, y de impresionar produciendo una sensación de poder al espectador y satisfacer al Dios honrado en los rituales en los que participaban. La importancia del sonido es la más evidente: aproximadamente el 86% de los objetos metálicos hallados han sido cascabeles (la mayoría fabricados con Cu-5% Sn).

Aunque la música creada en Mesoamérica es muy distinta a la de la cultura occidental, no solo en instrumentos, sino en cuanto a la misma teoría (en Occidente existen instrumentos que tocados de cierta forma producen tonos específicos, mientras que para los instrumentos mesoamericanos cada uno producía una gama mezclada de sonidos; Hosler, 2005), a la fecha no se han presentado estudios acerca del tipo de sonido buscado en los instrumentos en

Mesoamérica. Es importante mencionar que entonces le daban valor a lo que nosotros ahora entendemos como “disonancia”, de lo que se hablará con más detalle en la sección de discusión de resultados, en el apartado de sonido.

#### 4.1 El color y el brillo

El color “es la sensación que se produce en el observador como respuesta al estímulo de observar un objeto cuando incide la luz sobre él, aunque está relacionado con la fisicoquímica de la superficie del objeto” (Fraenza, Yonahara, Perié, 2013). El color que se percibe es la parte del espectro de luz que no absorbe dicho objeto; las longitudes de onda visibles de la luz están entre los 380 y 780 nm. Así, si se observa un objeto de color rojo es porque las longitudes de onda que corresponden a otros colores se absorben en mayor medida.

Guild y Wright (2006) demostraron, a partir de las leyes de Grassman, que cualquier color puede ser expresado como una adición de tres colores básicos (rojo, verde y azul) imposibles de conseguir a partir de la mezcla de los otros dos y determinaron experimentalmente los valores de los mismos; así que la manera de medirlos es determinando la cantidad de cada color básico presente en el color medurado ( $aR+bG+cB$ ). Estos colores suelen representarse en un círculo cromático, donde cada punto del mismo es un color, mezcla de determinadas cantidades de rojo, verde y azul, y al cual corresponde determinada longitud de onda, como se observa en la figura 2.

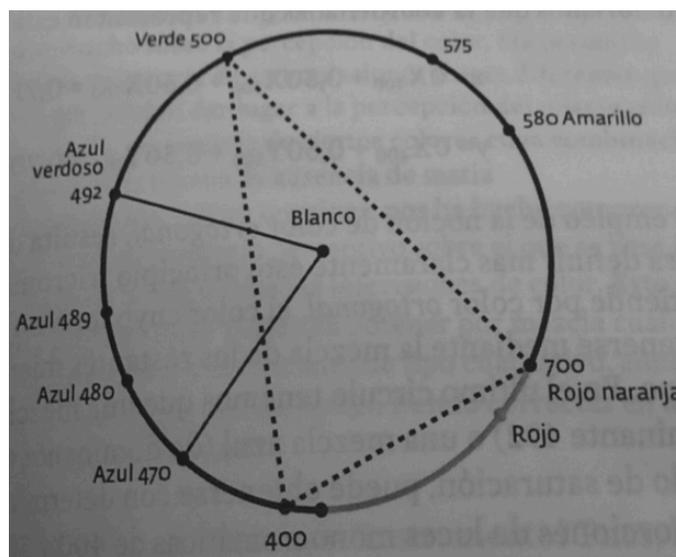


Figura 2. Círculo cromático. La parte gris del círculo se representa de esa manera porque no pertenece al espectro visible. Crédito de Fraenza, Yonahara y Perié.

Existen muchas maneras de representar la cantidad de cada espectro reflejado; en la mayor parte de los trabajos debido al extenso uso de las computadoras, suele elegirse un rango de 0 a 255.

Sin embargo, un mismo color puede percibirse distinto, debido a que puede existir un brillo diferente. Para cuantificarlo existe otra escala del color; la HSB (Hue-Matiz, Saturation-Saturación, Bright-Brillo) En ella, el matiz representa con qué tono se percibe un color (*azul marino*, *azul rey*, *azul cielo*), es decir, si el color es más claro o más oscuro; la saturación, qué tan puro es un color (qué tanto tiene de otro color), y el brillo es la cantidad de luz reflejada. A diferencia del matiz y la saturación, el brillo en teoría es independiente de los valores RGB. Así, el mismo color, con exactamente el mismo matiz y saturación puede tener una luminosidad distinta, por lo que podría percibirse distinto. Como se mencionó en la página anterior, el color es una sensación. Por lo tanto, aunque dos objetos tengan una naturaleza completamente distinta, debido a la mezcla de dos longitudes de onda, puede percibirse como el mismo color. Este fenómeno es conocido como metamerismo. En trabajos anteriores se ha inferido que hay aleaciones que pretenden recrear colores conocidos por los mesoamericanos, como el del oro (sol en su cenit), y del amanecer o el ocaso (Del Pilar, Fuentes, 2006); la explicación de cómo se logró a partir de objetos de color distinto se debe al metamerismo, aunque para demostrarlo se requeriría conocer el color de cada microconstituyente de las aleaciones, y cómo varía el mismo con tamaño de grano y contenido de elemento aleante para soluciones sólidas, por ejemplo.

#### 4.2 Sonido

El sonido es un fenómeno que involucra el transporte de ondas de energía elásticas a través de un medio elástico, que puede ser sólido o fluido (Fernández Valencia, 2007). Debido a que se trata de un movimiento ondulatorio, puede representarse mediante una transformada de Fourier; esto facilita su comprensión y estudio, puesto que el sonido puede representarse como una suma de curvas sinusoidales y por lo tanto pueden interpretarse cada una de estas ondas.

Las principales características de las ondas acústicas relacionadas a la música son distintas propiedades (amplitud de onda, frecuencia, forma de la onda y el tiempo de vibración). Estas propiedades dan como resultado distintos comportamientos: la amplitud de la onda determina la intensidad de un sonido (fuerte o quedo); la forma de la onda el timbre (que tan armónico o disonante es el sonido); el tiempo de vibración qué tan largo es y la frecuencia de la onda el tono del sonido (agudo, medio o grave). Todas ellas se observan en la figura 3.



Figura 3. Onda sonora

El espectro humano está comprendido aproximadamente entre los 20 y los 20 000 Hz. Cuando la frecuencia es menor de 20 Hz, las ondas son perceptibles pero no audibles, por lo que se denominan “infrasonidos”; cuando la frecuencia es de más de 20 000 Hz, tampoco son audibles aunque sí perceptibles y se llaman “ultrasonidos”. Este espectro se observa en el diagrama 1.

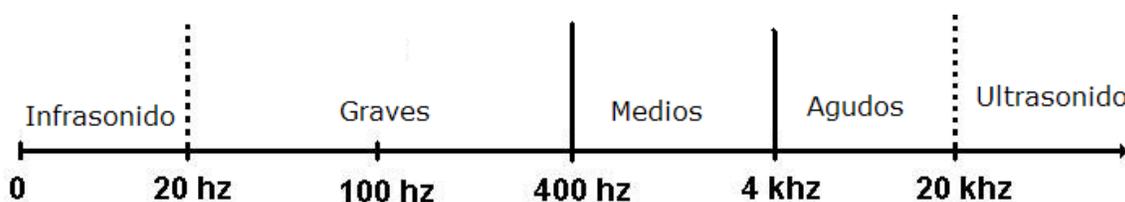


Diagrama 1. Espectro sonoro.

## 5. Experimentación

Se calculó una carga de 12 g para las probetas de medición de color, base cobre, a utilizar: 2.4% y 4.2 % en peso de Pb, las más usadas por los mexicas para cascabeles; 5%, 12% (usadas para cascabeles, hachas moneda, pinzas, entre otros) y 23% en peso de Sn (con la que se fabricaban aros, anillos, bezotes), las más ampliamente encontradas en la zona tarasca.

Se fundió cada aleación asegurando una atmósfera reductora, mediante el uso de 3 sopletes en crisoles de barro. Además se midieron sus tiempos de solidificación mediante termopares tipo K y registro de datos en computadora, y se obtuvo la rapidez de solidificación.

Las dimensiones aproximadas de cada probeta fueron de 3 cm de diámetro y 1 cm de altura (figura 4). Cada probeta se cortó a la mitad, verticalmente. Se realizó la preparación metalográfica (detallada en el anexo I). Se cuantificó el contenido relativo de cada microconstituyente, el tamaño del espaciamiento dendrítico secundario (EDS) utilizando un ocular graduado y se obtuvo la ecuación de Flemings que relaciona el tiempo de solidificación con el tamaño del EDS. Se calculó la composición química a partir de las imágenes obtenidas, y de los resultados del espectro arrojados por el microscopio electrónico de barrido.

Se midió el color y brillo, a partir de imágenes de las probetas capturadas bajo condiciones de iluminación similares, con ayuda de software especializado (Photoshop CS 5) en las escalas RGB y HSB.

Se refundieron las probetas en los mismos crisoles de barro, pero con el crisol inmerso en un recipiente con hielo, para asegurar una rapidez de solidificación distinta. Los tiempos de solidificación fueron medidos del mismo modo que las primeras probetas; sin embargo, no fue posible refundir las aleaciones Cu-Pb, ni la Cu-5% Sn. A estas probetas se les realizó una preparación y medición de color y brillo similares.

Se obtuvieron probetas cilíndricas, de aproximadamente 12 cm de altura y 2 cm de diámetro (figura 5). Se midieron sus propiedades (frecuencia e intensidad) y determinaron sus comportamientos. Ello se hizo grabando el sonido producido al ser golpeado por un componente cerámico y analizando con software especializado (Music Editor Free).

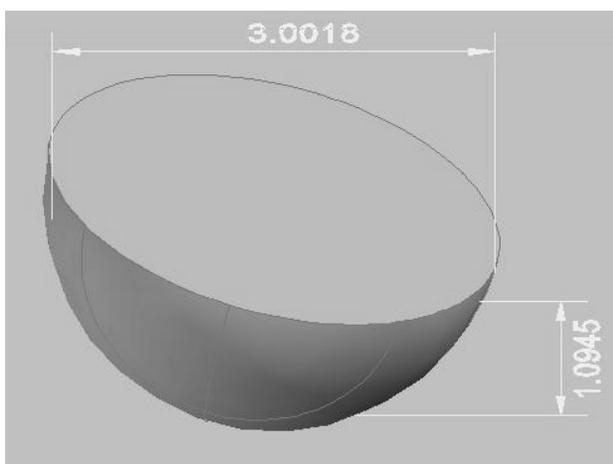


Figura 4. Probetas fabricadas para la medición de color.

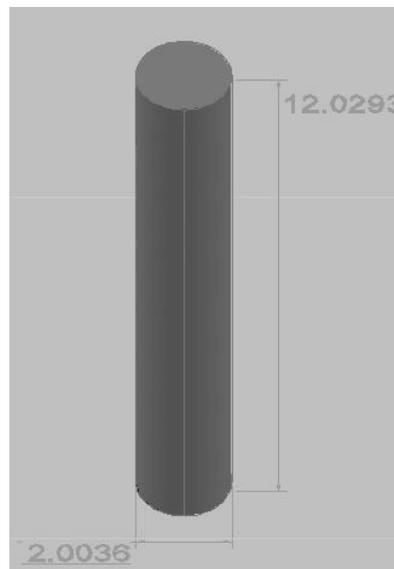


Figura 5. Probetas utilizadas para la medición de sonido.

En la tabla 4 se resume el desarrollo experimental.

<b>Tabla 4. Aleaciones fabricadas</b>			
Aleación fabricada	Probeta de medición de color	Probeta de sonido	Refundición
Cu-2.4 % Pb	✓	✓	×
Cu-4.2% Pb	✓	✓	×
Cu-5% Sn	✓	✓	×
Cu-12% Sn	✓	✓	✓
Cu-23% Sn	✓	✓	✓

## 6. Resultados

Las cantidades de microconstituyentes, velocidad de solidificación, y las propiedades de color, sonido y brillo son presentados en las tablas 5 a 9b.

% Sn	Resultado	% $\alpha$	% eutectoide
5	Teórico	84.64	15.36
	Experimental	85	15
12	Teórico	63.14	36.86
	Experimental	65	35
23	Teórico	32.41	67.59
	Experimental	40	60

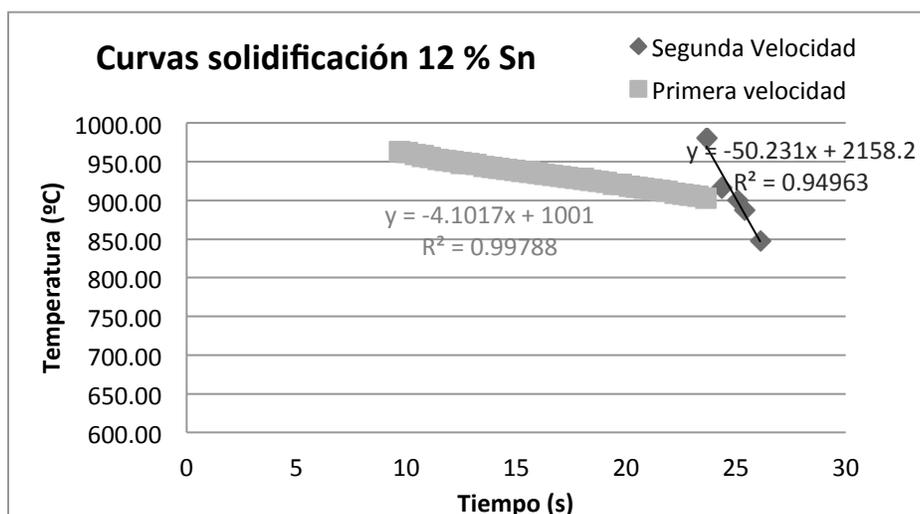


Gráfico 1. Curvas de solidificación Cu-12% Sn

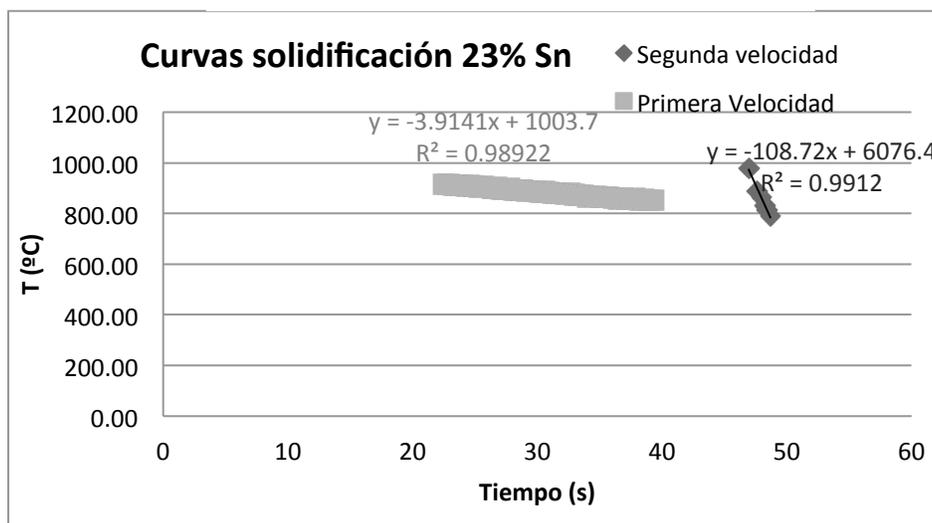
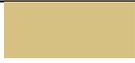


Gráfico 2. Curvas de solidificación Cu-23% Sn

%Sn	$V_{\text{solidificación}} (^{\circ}\text{C/s})$	EDS ( $\mu\text{m}$ )
5*	$\approx 4$	30
12	50.231	20
	4.1017	40
23	108.72	20
	3.9141	25

$V_{\text{solidif}}$	%Sn	% $\alpha$	% eutectoide	EDS	R	G	B	H	S	B	html	Color
Baja	5*	90	10	40	194	137	131	9	32	76	C28983	
	12	70	8	30	215	193	130	44	40	84	D7C182	
	23	45	57	25	160	155	148	35	7	63	A09B94	
Alta	12	70	8	20	199	177	119	43	40	78	C7B177	
	23	45	57	20	169	157	151	20	11	66	A99D97	

%Sn	R	G	B	H	S	B	Html	Color
0	198	134	116	13	41	78	C68674	
5	194	137	131	9	32	76	C28983	
12	215	193	130	44	40	84	D7C182	
23	160	155	148	35	7	63	A09B94	

%Pb	R	G	B	H	S	B	Html	Color
0	198	134	116	13	41	78	C68674	
2.4	211	144	140	3	34	83	D3908C	
4.2	212	154	146	7	31	83	D49A92	

Tabla 9a. Frecuencia e intensidad para porcentaje de estaño		
% Sn	Hz	dB
5	4250	-20
12	4800	-28
23	4950	-20

Tabla 9b. Frecuencia e intensidad para porcentaje de plomo		
%Pb	Hz	dB
2.4	22 212	-97
4.8	17 914	-76

Las aleaciones Cu-Pb sólo se trabajaron a una velocidad de solidificación baja debido a que no habían sido estudiadas, por lo que variar velocidades de solidificación deberá ser un trabajo posterior. Solo se utilizó una velocidad de solidificación en el sonido para poder comparar todas las aleaciones.

En las figuras 6 y 7 se observan ejemplos de las microestructuras obtenidas de colada, para la familia de estaño y plomo.

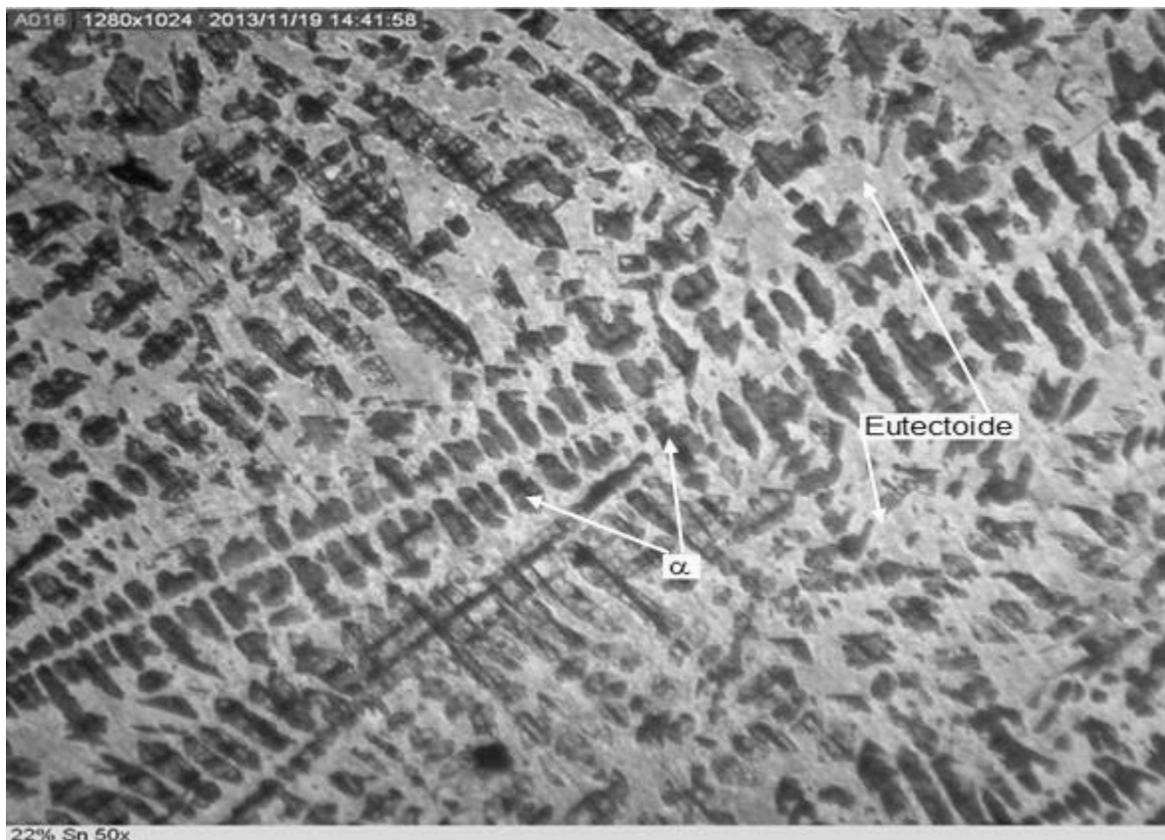


Figura 6. Aleación Cu-12% Sn. Se señalan los microconstituyentes presentes. En todas las aleaciones de esta familia los microconstituyentes son los mismos. 26

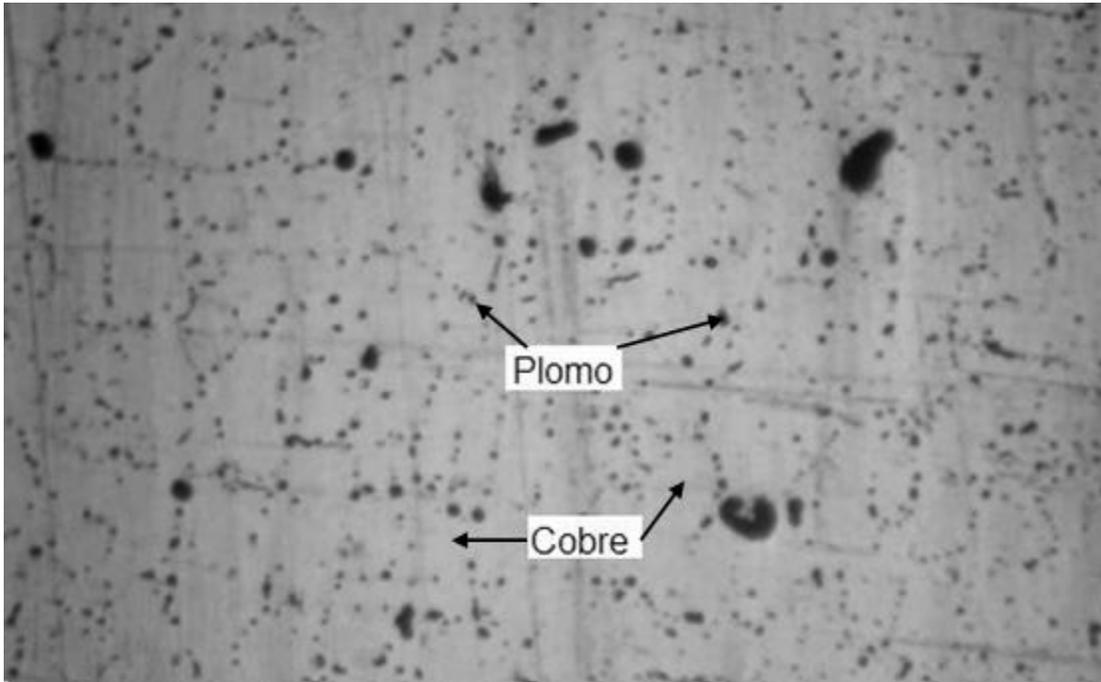


Figura 7. Aleación Cu- 2.4%Pb. Se señalan los microconstituyentes presentes. En todas las aleaciones de esta familia los microconstituyentes son los mismos.

## 7. Discusión de Resultados

### 7.1 Microestructura

#### 7.1.1 Bronces Cobre-Estaño

En la familia de las aleaciones Cu-Sn (diagrama 2) se encuentran presentes dos fases (solución sólida  $\alpha$  y solución sólida  $\epsilon$ ), presentes en forma de dos microconstituyentes (figura 6; eutectoide, formado por  $\alpha$  y  $\epsilon$ , y solución sólida  $\alpha$ ).

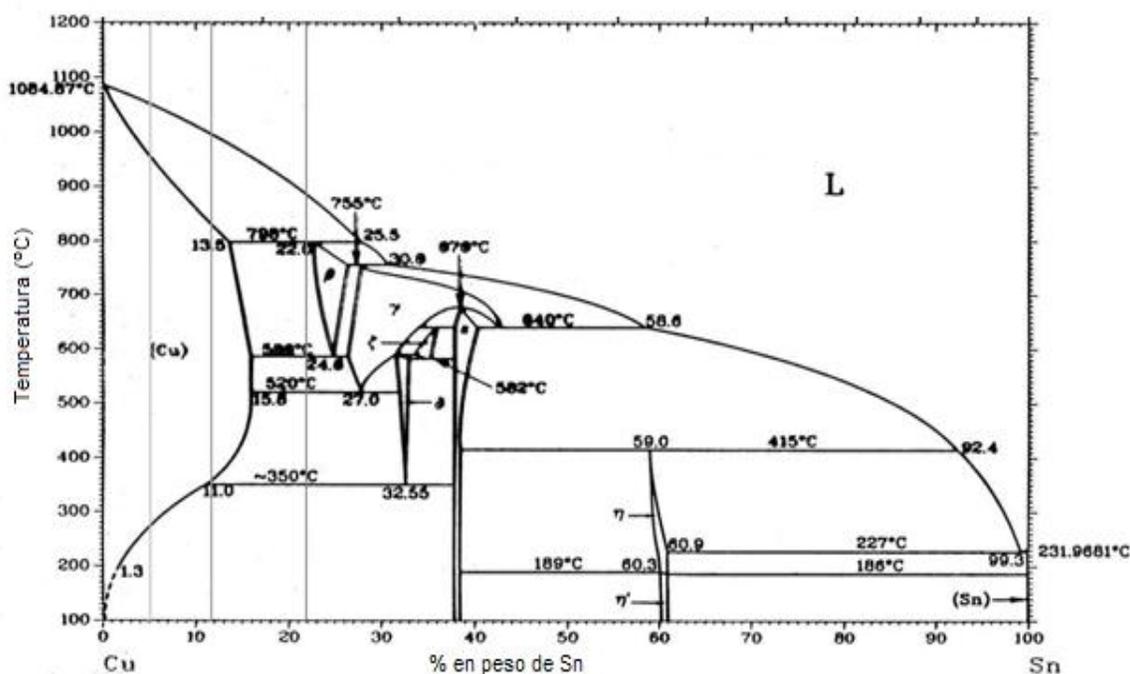


Diagrama 2. Diagrama de fases Cu-Sn. Las líneas verticales corresponden a las aleaciones fabricadas.

El mayor contenido de elemento aleante provoca una disminución en la cantidad relativa del microconstituyente  $\alpha$  linealmente, como puede observarse en el gráfico 3 y como es esperado de acuerdo al diagrama de fases. Para comprobar que aleación corresponde a cada punto, se recomienda consultar la tabla 5.

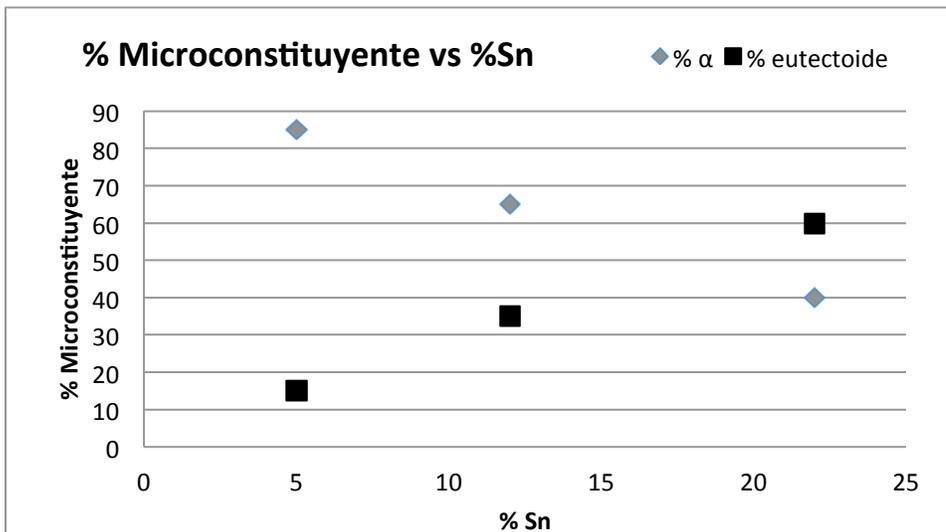


Gráfico 3. Efecto de la adición de Estaño en la cantidad relativa de los microconstituyentes.

La cantidad máxima de solución sólida se presenta en la aleación con 5% de estaño; la de 18% se esperaría que tuviera la misma cantidad de solución sólida y eutectoide, mientras que la de 22% Sn tiene mayor cantidad de eutectoide que de solución sólida  $\alpha$ . En las aleaciones Cu-Sn, el tamaño del EDS aumenta conforme aumenta la presencia de  $\alpha$  debido a que se necesita mayor calentamiento para fundirla y esto provoca un enfriamiento más lento. En la figura 5 se observan dos metalografías a 50x de las aleaciones con 5 (30  $\mu\text{m}$ ) y 22 (20  $\mu\text{m}$ ) %Sn.

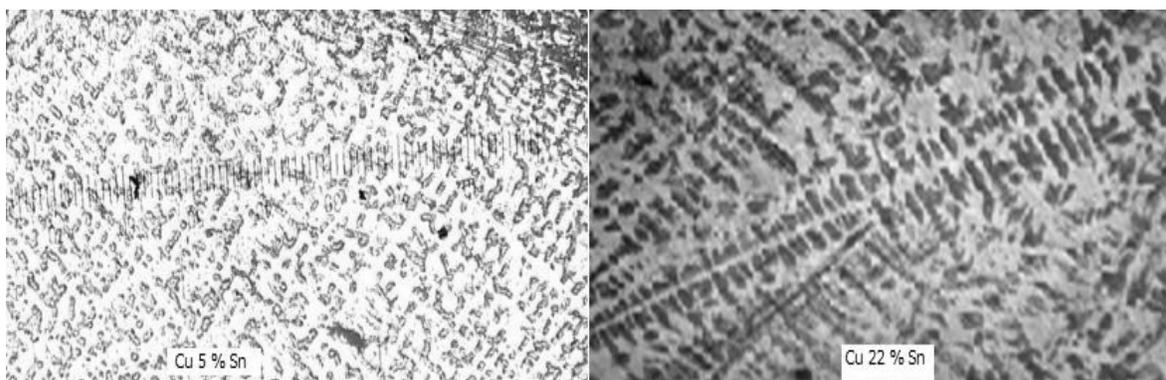


Figura 5. Metalografía de las piezas fundidas, a velocidad de solidificación constante, 50x. Se observa que el tamaño del EDS es mayor en la aleación con 5% Sn.

El efecto del contenido de solución sólida  $\alpha$  se observa en el gráfico 4; a mayor contenido de  $\alpha$ , el tamaño del EDS y además se observa una tendencia inversamente proporcional: a mayor contenido de solución sólida, mayor tamaño del EDS; sin embargo esta aventurado concluir al respecto, puesto que las velocidades de solidificación fueron parecidas, pero no iguales.

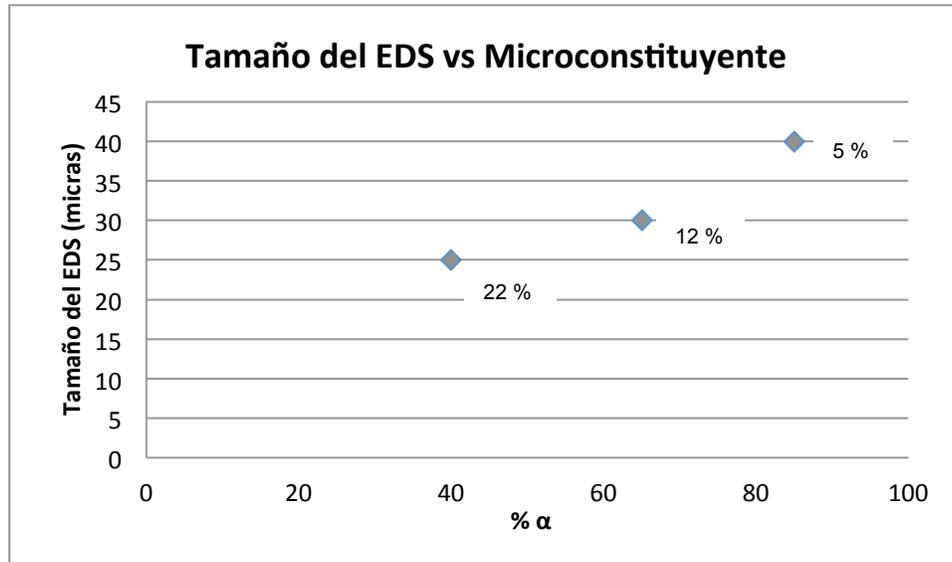


Gráfico 4. Efecto del % de  $\alpha$  en el EDS a  $V_{\text{solidificación}}$  constante. Se indica la aleación correspondiente a cada % $\alpha$ .

#### 7.1.2 Bronces Cobre-Plomo

En el diagrama 3 se observa la familia de aleaciones Cu-Pb; sin embargo, los microconstituyentes serán solamente Cobre y Plomo (ver figura 7), por lo que se recomendaría para un trabajo posterior el análisis de otras variables metalúrgicas, como tamaño de grano.

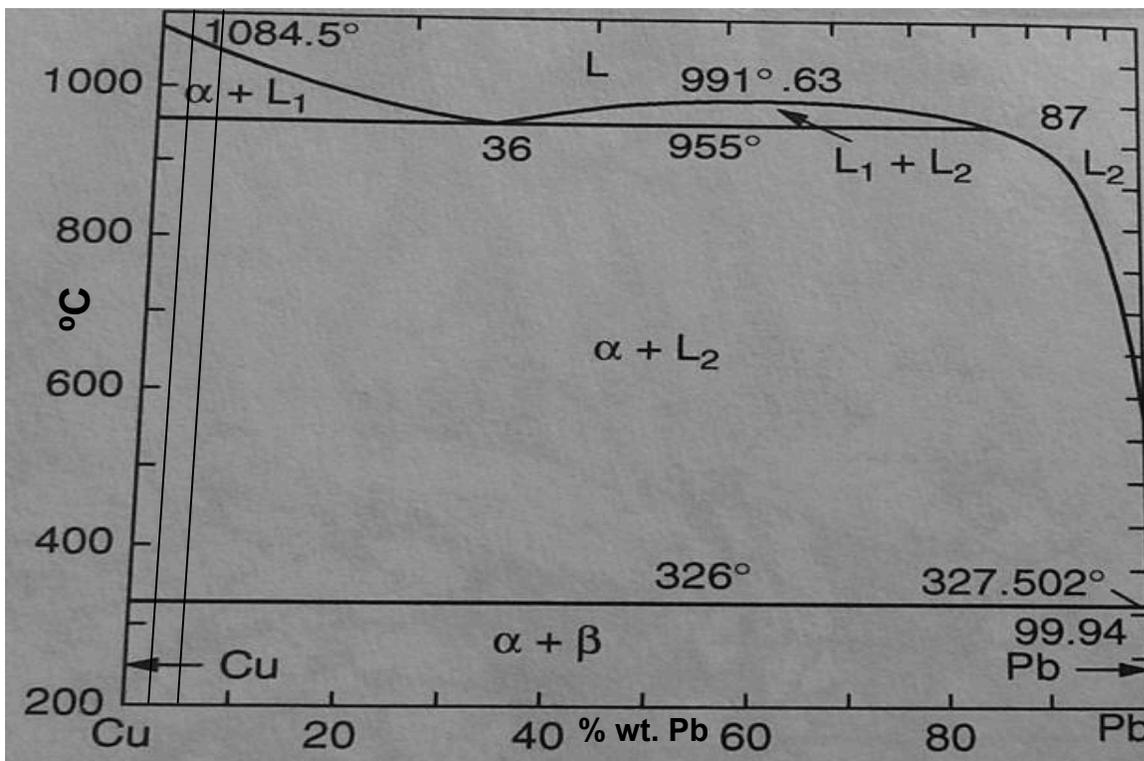


Diagrama 3. Diagrama de fases Cu-Pb. Las líneas verticales corresponden a las aleaciones fabricadas.

## 7.2 Rapidez de solidificación

El modelo de Flemings relaciona la rapidez de solidificación con el espaciamiento dendrítico secundario. En un trabajo anterior (Del Pilar, Fuentes) se halló una correlación entre el tamaño del EDS y el brillo (aunque a distintas composiciones químicas) así que la rapidez de enfriamiento es una de las variables que afecta la microestructura y ésta incide en la luminosidad.

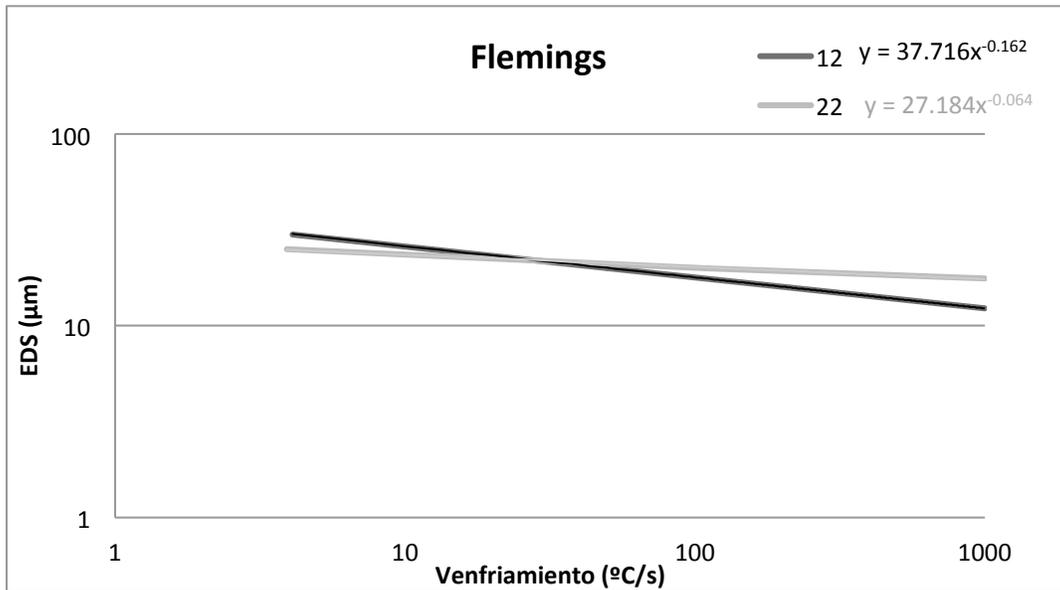


Gráfico 5. Modelo de Flemings para las aleaciones de 12% y 23% Sn. La constante indica el máximo tamaño del EDS; el exponente qué tanto se ve afectado el mismo cuando varía la velocidad de solidificación; en la aleación con 12% Sn este efecto es mayor en un orden de magnitud.

En el gráfico 5 se puede observar que el tamaño del EDS se ve más afectado por la rapidez de solidificación para la aleación que tiene menor contenido de estaño; ésta diferencia es de un orden de magnitud. Se debe a que cuando hay más estaño, el punto de fusión de la aleación es menor y a que la solución sólida probablemente tenga una mayor conductividad térmica.

## 7.3 Color (RGB)

Las familias de aleaciones fabricadas presentan un comportamiento diferente; mientras que las de plomo no presentan un color distinto a simple vista, las de estaño pueden clasificarse fácilmente de mayor a menor contenido por su color, como puede observarse en la figura 6.

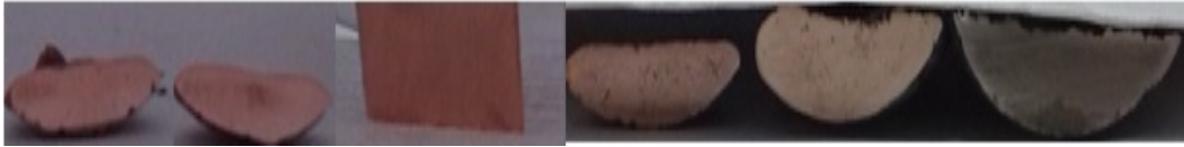


Figura 6. Imágenes de las piezas analizadas. De izquierda a derecha 2.4%, 4.2 % Pb, Cu puro, 5% Sn, 12% Sn y 23% Sn.

En las aleaciones Cu-Sn se buscó una tendencia entre la cantidad relativa de los microconstituyentes y los valores de RGB y no existe ninguna. Sin embargo, existen dos correlaciones y una tendencia entre los valores de RGB con el contenido de elemento aleante, que se observa en el gráfico 6.

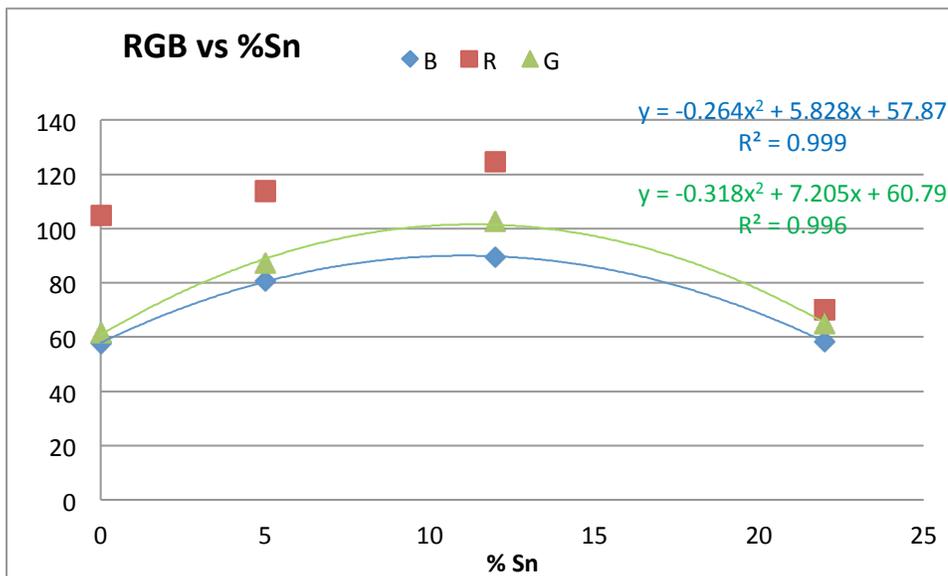


Gráfico 6. Efecto de la adición de elemento aleante en cada color del espectro de luz, y correlaciones obtenidas.

En el gráfico 6 se observan las dos correlaciones y la tendencia entre cada espectro del color y el contenido de estaño. Todas ellas son cuadráticas, y se observa que el máximo de los valores se encuentra en 12% Sn. Por lo tanto, para hacer un análisis químico no destructivo rápido, puede hacerse uso de alguna de estas correlaciones, principalmente del azul. Al haber correlación entre los valores de RGB y el contenido de elemento aleante, y ninguno con los microconstituyentes, se puede afirmar que el color depende únicamente del contenido de elemento aleante

Cuando aumenta el contenido de plomo, el comportamiento en relación al color, los valores de RGB disminuyen. Sin embargo, después del 2.4% este cambio es apenas perceptible, por lo que se necesitaría una mayor cantidad de aleaciones de Plomo para confirmar o desmentir cualquier tendencia.

En resumen, se observa que entre mayor sea la cantidad de solución sólida  $\alpha$ , mayores serán los valores de RGB para las aleaciones Cu-Sn, porque el eutectoide tiene un color gris que absorbe más cantidad de luz; para las aleaciones Cu-Pb, a mayor cantidad de Plomo presente, los valores disminuirán, debido al color del macroconstituyente (Plomo).

El espaciamiento dendrítico secundario también afecta los valores de RGB, aunque su efecto es comparativamente menor al que tiene la composición química. El tamaño del EDS tiene incidencia sobre los valores de RGB, como se observa en los gráficos 7 y 8.

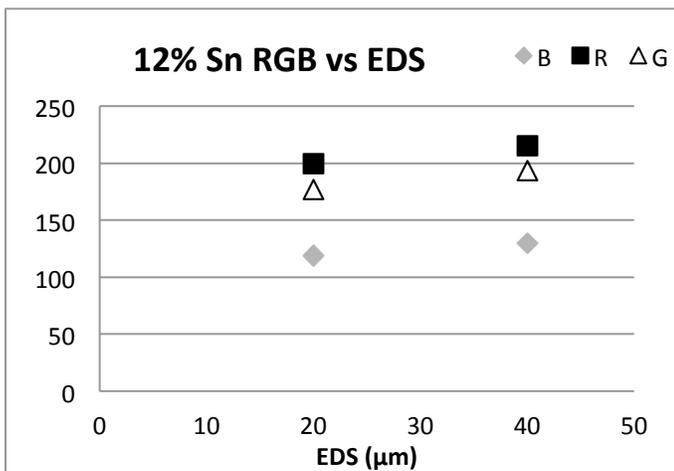


Gráfico 7. Efecto del EDS en valores RGB 12% Sn (distinta  $V_{enf}$ )

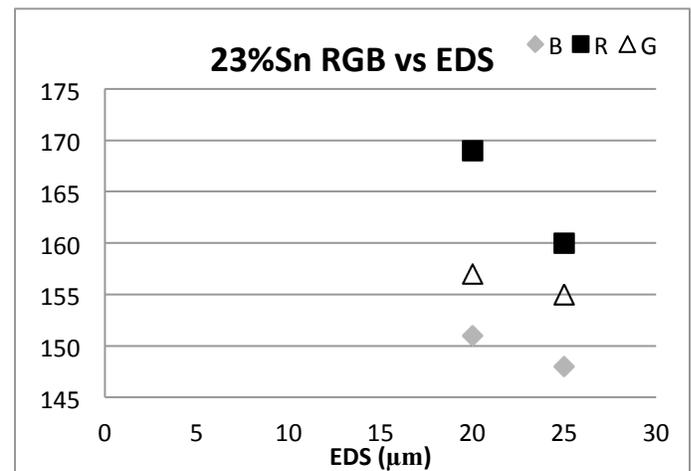


Gráfico 8. Efecto del EDS en valores RGB 23%Sn (distinta  $V_{enfr}$ ).

El comportamiento es distinto para cada aleación; el contenido de  $\alpha$  explica estos comportamientos, debido a que es la fase que menos absorbe luz: en la de 12% de estaño, entre mayor sea el tamaño del EDS, mayores serán los valores de RGB (gráfico 7), en la de 23% Sn; conforme aumente el tamaño del EDS los valores de RGB serán menores (gráfico 8).

Entre mayor sea la velocidad de solidificación para aleaciones con una gran cantidad de  $\alpha$ , los valores de RGB serán menores; para aleaciones con bajo contenido de  $\alpha$ , a mayor velocidad de solidificación, los valores de RGB serán mayores.

Para las aleaciones Cu-Sn la adición de elemento aleante es explicada debido a que se buscaba un cambio significativo en el color, apreciable a simple vista. En una tesis anterior (Del Pilar, Fuentes) se propuso que se buscaba imitar el color del oro con las aleación de 13%. Un mito puede explicar otra similitud complementaria: “en el Soconusco se creía que unos seres subterráneos recogieron de la superficie el oro del Sol, lo llevaron al centro de la tierra y lo pusieron en unas raíces. Crecieron las raíces hacia arriba, y brotó sobre la tierra la planta del maíz, con sus granos del color del oro.” (López Austin, 1989, Pp. 104-105). Esta relación explica la relación entre la orfebrería y metalurgia en general, con los de la fertilidad, como en el caso mencionado en el marco teórico (Xipe-Tótec). En el caso de la aleación con 5%Sn es probable que el color que se buscara reproducir fuera el del amanecer o del ocaso, incluso de eclipses lunares; la de 23% Sn probablemente el de la luna cuando se ve al atardecer o al inicio de la noche.

La función de los objetos metálicos es distinta: los objetos hechos con Cu-5% Sn probablemente eran utilizados para rituales que fueran llevados a la hora del amanecer o el atardecer del sol; los de 12% Sn para aquellos del medio día donde el Sol fuera una deidad importante y los de 23% Sn donde la Luna, de ese color al crepúsculo, lo fuera. Ahora se muestra en la tabla 10 la similitud entre los colores de las aleaciones Cu-Sn y los colores que presumiblemente se intentaban recrear (la plata solo se agregó como comparativo). Aunque sería interesante añadir el color del maíz, de la luna y el crepúsculo, su medición es más difícil y al pretender recrear un fenómeno natural, el color no era más que un signo.

Tabla 10. Comparación de color								
Metal/Aleación	R	G	B	H	S	B	HTML	Color
Cu	198	134	116	13	41	78	C68674	
Cu-5% Sn	196	135	133	2	32	77	C48785	
Au	221	196	136	42	38	87	DDC488	
Cu-12% Sn	216	189	136	40	37	85	D8BD88	
Cu-23% Sn	157	154	151	30	4	62	9D9A97	

#### 7.4 Brillo (HSB)

Con relación a la cantidad relativa de microconstituyente no existe una tendencia ni correlación observable. En el gráfico 9 se representa el efecto que tiene la cantidad relativa de estaño en los valores de HSB. Existe una correlación lineal entre el matiz y el contenido de aleante, que incluso se mantiene hasta el color del estaño puro. El brillo presenta una tendencia parabólica, con un valor máximo del brillo (y de RGB) en la aleación con 12% Sn. Esto se debe a que el estaño refleja una mayor cantidad de luz que el cobre, y las propiedades ópticas dependen de la escala atómica; además, el color comienza a ser más claro (el matiz aumenta) y la saturación, hacia el color gris del estaño, aún no es tanta que disminuya el brillo.

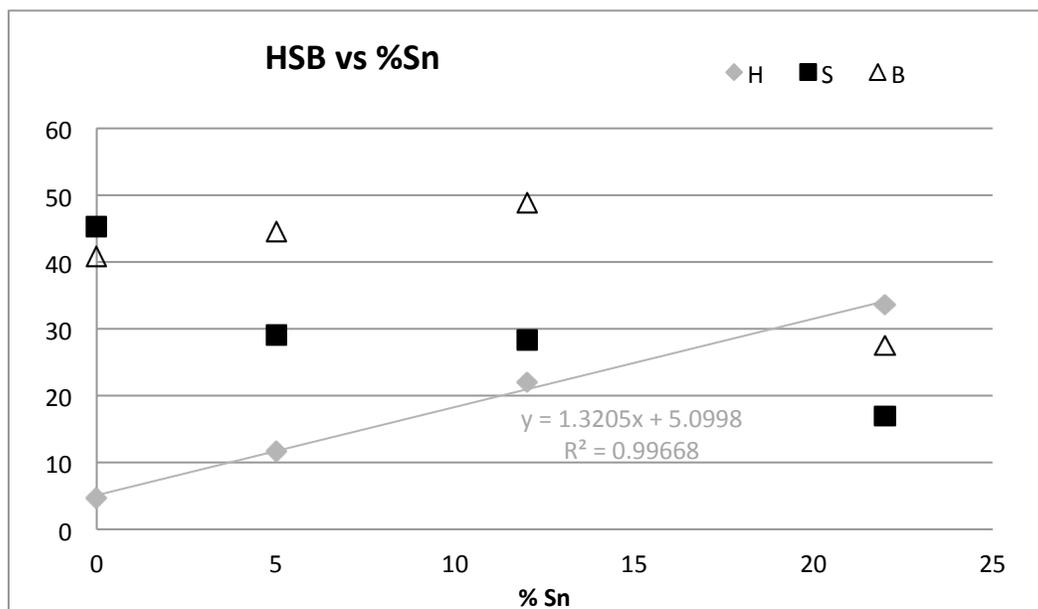


Gráfico 9. Efecto del % Sn en los valores de RGB y correlación con matiz (H).

En trabajos previos se halló una tendencia entre el brillo y el EDS (Del Pilar, Fuentes, 2006) también reportada en el gráfico 10. Se observa que, conforme aumenta el tamaño del EDS la saturación también aumenta, por la mayor presencia de estaño. A nivel microestructural, el espacio entre los brazos dendríticos es mayor, por lo que mayor cantidad de eutectoide (gris) es visible. Como consecuencia, el brillo aumenta si hay mayor cantidad de  $\alpha$  y también aumenta si el EDS es mayor; la saturación aumenta proporcionalmente con el EDS.

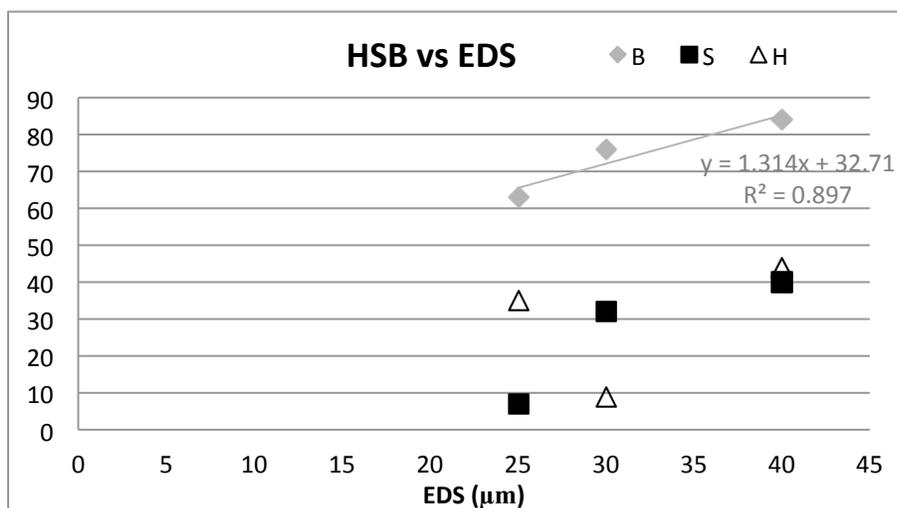


Gráfico 10. Efecto del EDS en los valores de HSB. Se observa la tendencia del brillo y la saturación. Sin embargo, esta correlación (ensayada para diversos contenidos de estaño a rapidez de solidificación constante) no es tan clara como la reportada en el gráfico 11, donde el contenido de estaño muestra una correlación lineal, por lo que se puede afirmar que, aunque el brillo aumenta conforme aumenta el EDS, hasta el 12% Sn el brillo aumenta linealmente con el contenido de Estaño.

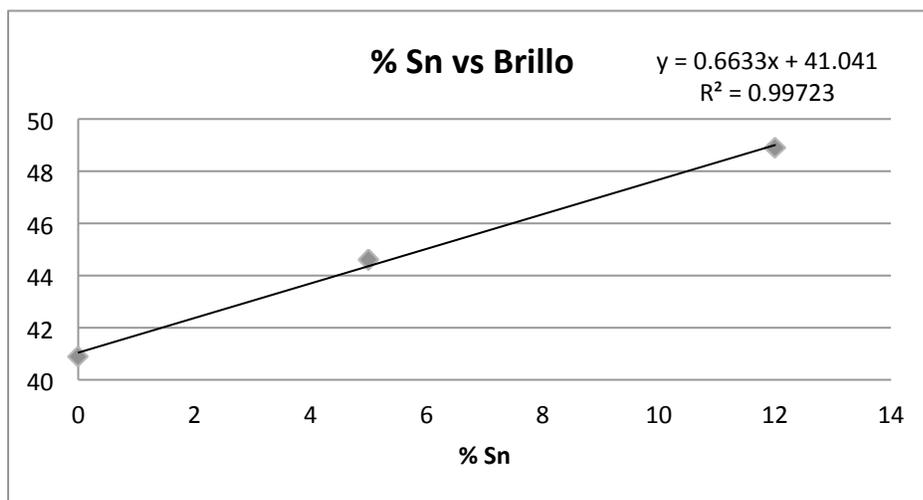


Gráfico 11. Efecto del % Sn en el valor del brillo y su correlación.

Por lo tanto es posible que debido al error experimental, la relación entre el EDS y el brillo reportada por Del Pilar y Fuentes no haya podido ser reproducida, pero también es posible que no exista tal correlación, sino solamente una tendencia (a mayor EDS, mayor brillo). Se recomienda llevar a cabo este experimento en investigaciones posteriores con un método más preciso.

Los valores de HSB en los bronce al plomo varían, aunque este cambio es mínimo debido posiblemente a la poca cantidad de elemento aleante agregado, lo que indica que si el tamaño de grano es grande, el plomo (intergranular) no afecta el comportamiento ni de la saturación ni del brillo.

El efecto que tiene el valor del EDS en los valores de HSB para las aleaciones con Sn se observa en los gráficos 12 y 13.

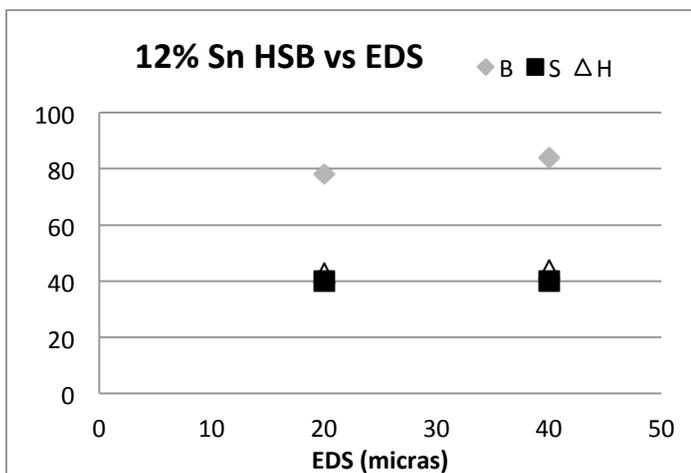


Gráfico 12. Efecto del EDS en los valores HSB en la aleación con 12% Sn.

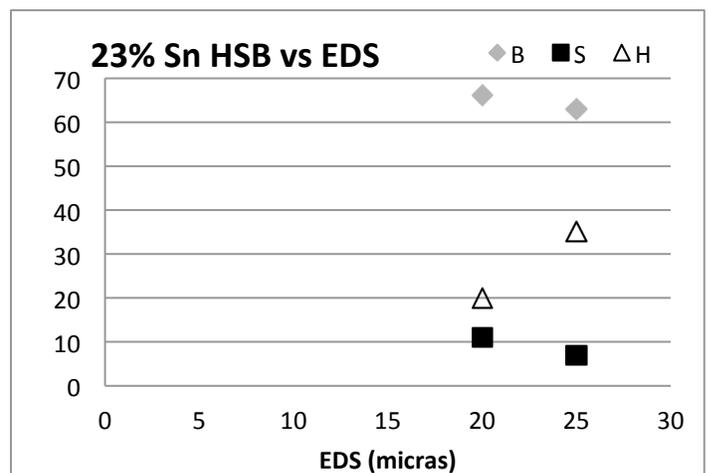


Gráfico 13. Efecto del EDS en los valores HSB en la aleación con 23% Sn.

La tendencia es similar a la mostrada para los valores de RGB, debido a que, en el caso de la aleación Cu-12% Sn, cuando aumenta el EDS,  $\alpha$  es más visible, lo que aumenta los valores de HSB; para la de 23% de estaño cuando aumenta el EDS hace menos visible porque existe mayor cantidad de eutectoide, y los valores de HSB son mayores.

Entre mayor sea la velocidad de solidificación para aleaciones con una gran cantidad de  $\alpha$  (más del 50%), el EDS disminuye y por lo tanto el brillo también;

cuando aumente la rapidez de solidificación para las aleaciones con poco  $\alpha$  el EDS disminuye y el brillo aumenta.

Para las aleaciones de Cu-Sn el brillo tiende a aumentar conforme aumenta la cantidad de estaño. Por lo tanto, si se quiere un objeto que sea usado en ritos donde la luminosidad sea importante, se necesita un objeto con menor cantidad de estaño, preferentemente de 12%. Hasta ese contenido de aleante, el brillo aumenta linealmente con el contenido de Estaño. En las aleaciones Cu-Pb el brillo disminuye imperceptiblemente conforme aumenta el contenido de plomo; cuando aumenta el contenido de plomo la saturación disminuye y el valor del matiz aumenta significativamente. Sin embargo, estos cambios solo son notorios para valores muy bajos de elemento aleante (estas aleaciones se usaban para cascabeles), por lo que se deduce en las aleaciones Cu-Pb no se buscaba un cambio en el color ni brillo al agregar el aleante, y menos es la razón para la producción de las aleaciones fabricadas. La explicación es, por tanto, el sonido.

Es necesario recalcar que, aunque en este trabajo se analizan por separado las propiedades importantes (color, brillo, sonido) la selección de material, como en cualquier ámbito ingenieril se daba no por la satisfacción de una de ellas, sino por el desempeño global que tiene el objeto. Así, si una aleación cumplía con el estándar de brillo, pero su sonido no era el deseado, o bien se elegía otra aleación o se usaban ambas. De cualquier modo, ese es tema para un trabajo posterior.

### 7.5 Sonido

La intensidad es, como su nombre indica, que tan estridente o quedo es un sonido; este comportamiento es presentado en el gráfico 14, para broncees al estaño. Las aleaciones de plomo no se grafica pues su frecuencia es tan alta que impide observar la tendencia de las aleaciones con estaño.

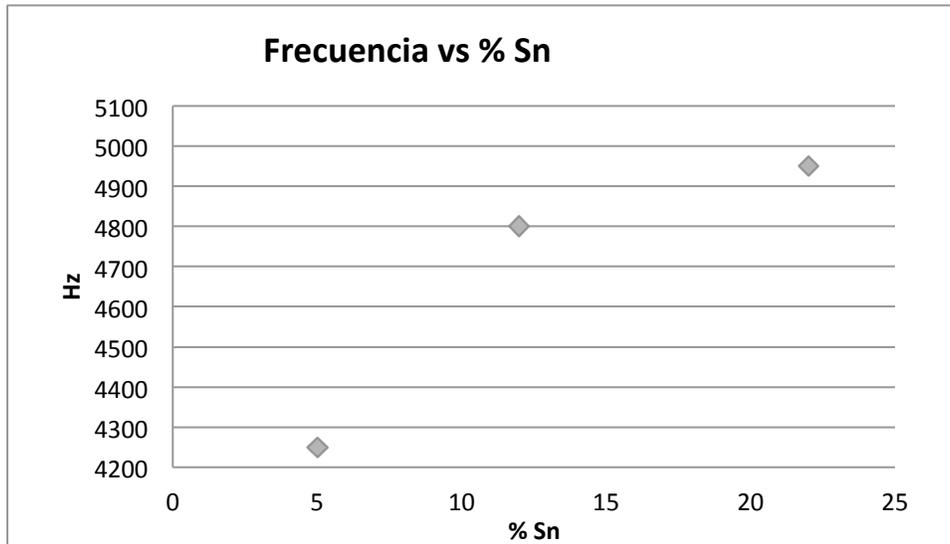


Gráfico 14. Efecto de la cantidad relativa de estaño en la frecuencia.

En las aleaciones Cu-Sn existe una tendencia aparentemente logarítmica: a partir de aproximadamente el 15% Sn, la frecuencia ya no varía significativamente; sin embargo, en general, cuando aumenta el contenido de aleante, la frecuencia aumenta. Para la familia de aleaciones Cu-Pb no se cuenta con suficientes datos para afirmar esto; de cualquier forma en ambos casos se recomienda ampliar el espectro de aleaciones ensayadas.

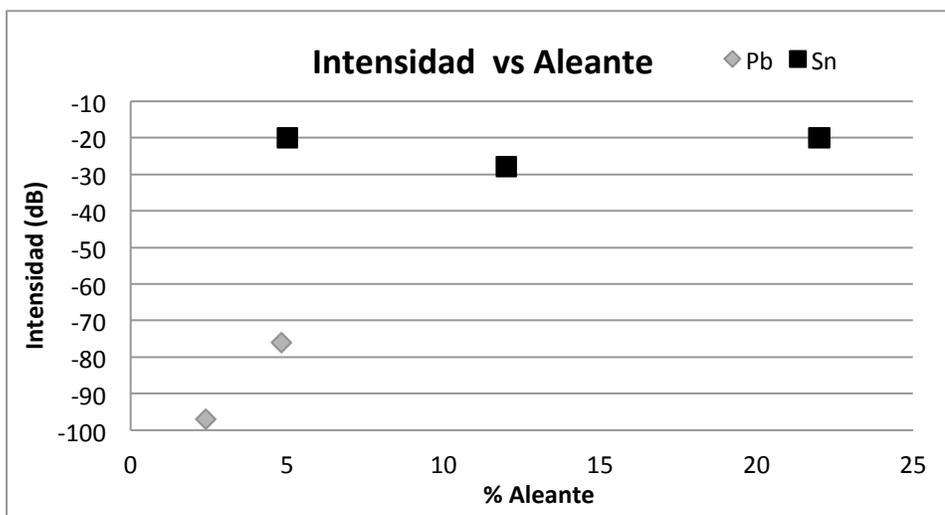


Gráfico 15. Efecto cantidad relativa aleante en la intensidad.

El efecto del contenido de elemento aleante en la intensidad del sonido se observa en el gráfico 15.

Aunque en la familia de Cu-Pb la intensidad del sonido parece disminuir conforme aumenta el contenido de este último, no se cuenta con datos suficientes para afirmarlo. La familia de Cu-Sn no muestra una tendencia clara. Las aleaciones de Plomo producen un sonido más fuerte; las de Estaño producen un sonido más quedo. Para poder observar cómo afecta el sonido se requeriría conocer el sonido del cobre puro, pues no se tiene un punto de comparación entre ambas familias.

Por otro lado, se buscaron relaciones entre microestructura y las características del sonido, sin encontrarlas. Se puede afirmar entonces que el sonido fundamental depende exclusivamente de la cantidad de elemento aleante.

Es importante mencionar que el sonido es un comportamiento completamente subjetivo. Lo que convencionalmente se considera un sonido más armónico es un sonido que en la línea de la gráfica presenta un único pico, por lo que se puede aseverar que el Plomo provoca un sonido más disonante que el Estaño. Esto se observa en la figura 7.

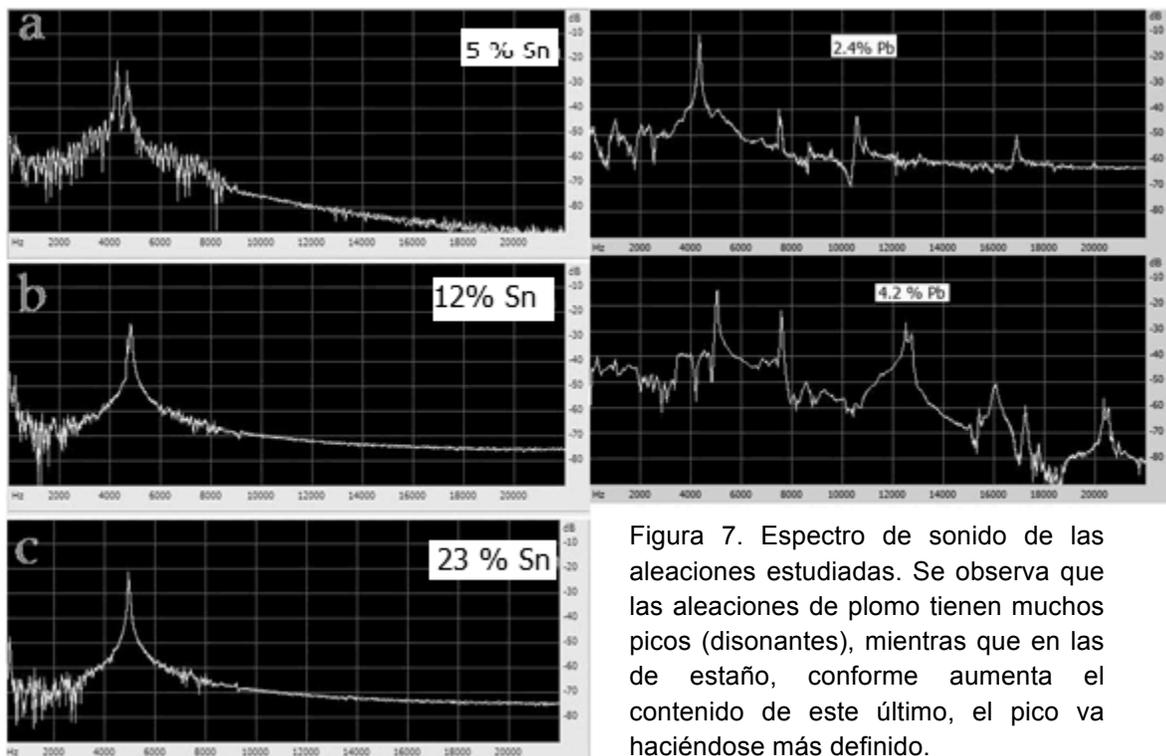


Figura 7. Espectro de sonido de las aleaciones estudiadas. Se observa que las aleaciones de plomo tienen muchos picos (disonantes), mientras que en las de estaño, conforme aumenta el contenido de este último, el pico va haciéndose más definido.

Este comportamiento puede verse resumido en el diagrama 4.



Diagrama 4. Disonancia/Armonía de cada aleación

Pese a ser la aleación con mayor armonía, la de 23% Sn no se utilizó para la fabricación de cascabeles, por lo que se infiere que ese sonido no presentaba un comportamiento muy apreciado; la mayor parte de los cascabeles de bronce al estaño contenían 5% de este último, aunque también se han encontrado, en menor medida, cascabeles fabricados con la aleación Cu-12% Sn, de lo que se discutirá en mayor medida en la sección 6.6. Los cascabeles tenían también una función estética (recrear colores, como el del oro): los nobles al ir a la guerra, o los sacerdotes en los rituales, usaban cascabeles en los tobillos (pequeños, sonido agudo) y en la cintura (grandes, sonido grave). Aunque en cada ritual los objetos de una aleación tuvieran un lugar más importante, lo más probable es que estuvieran presentes también las demás aleaciones, pues los objetos de cada una cumplían una función específica. Por ejemplo, no se han hallado objetos de tipo “utilitario” con más del 5% Sn; tampoco se tiene evidencia del uso del bronce con 23% Sn en cascabeles, ni del uso de una aleación con más de 13% Sn en pinzas. El caso de las aleaciones Cu-Pb es distinto. En ellas, no se buscaba cambiar el color, puesto que el cambio es imperceptible prácticamente; además, después de la adición del 2% de plomo, no existe un cambio apreciable, por lo que el plomo no se añadía con intención de cambiar el color (en la de 5%Sn existe un apreciable cambio de color respecto al cobre puro).

### 7.5.1 Infrasonido y Ultrasonido

Algunas de las aleaciones cuantificadas no solamente presentan ondas sonoras en el espectro audible. Las aleaciones de Plomo presentan infrasonido, lo cual podría explicar la razón de su uso en la fabricación de cascabeles, porque se ha demostrado que los infrasonidos tienen diversos efectos en el ánimo de las personas que los perciben (Tuzin, 1984; Fernández Valencia, 2007). En la figura 8 se observa el análisis acústico de ambas aleaciones; un ciclo correspondiente a las longitudes de onda del infrasonido.

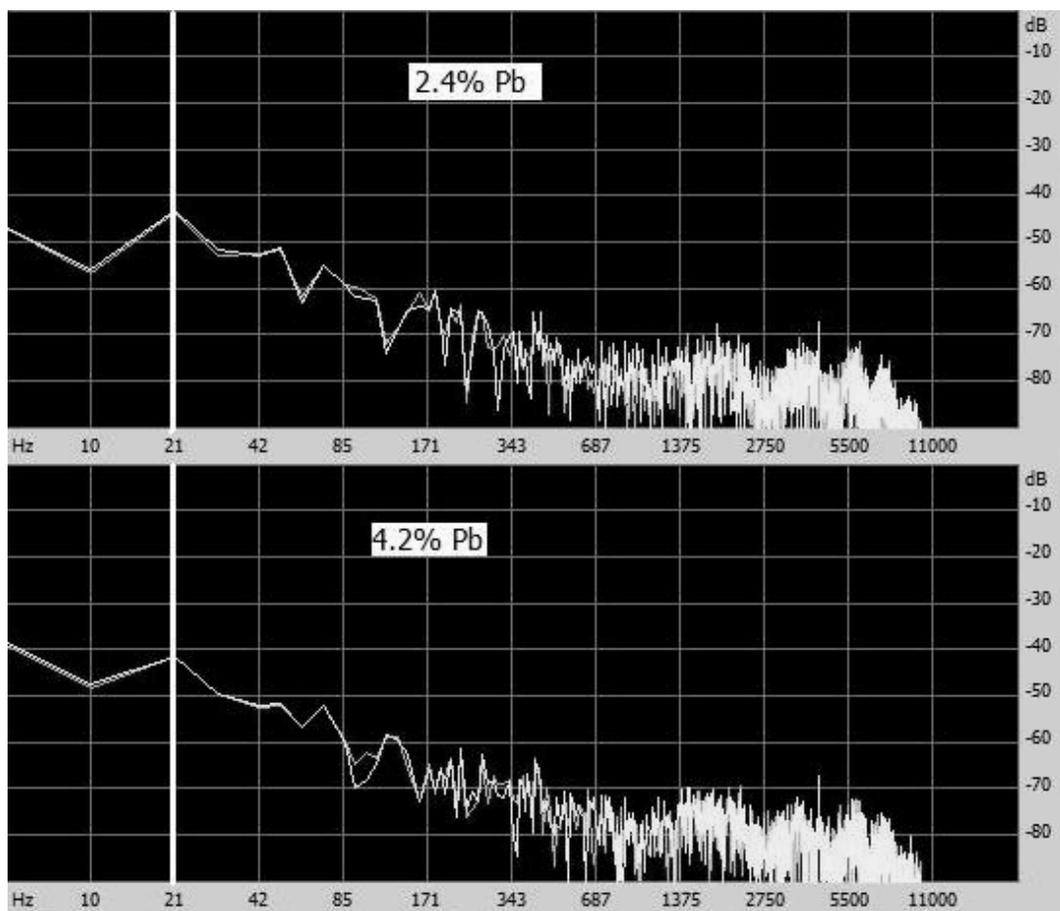


Figura 8. Infrasonido en aleaciones Cu-Pb.

El hecho de que exista infrasonido y que no haya un cambio perceptible en el brillo ni en el color demuestra que la adición de plomo fue con el fin expreso de alterar las ondas acústicas producidas.

En el caso de las aleaciones Cu-Sn, se observa en la figura 9 la presencia de infrasonido en la aleación con 5% y 12% Sn. Por lo tanto, los cascabeles de aleaciones Cu-Pb se produjeron con el fin de producir infrasonido, mientras que los cascabeles de aleaciones Cu-Sn se por su sonido disonante, por la presencia de infrasonido y por el color que tenían. Recordar que no se han hallado cascabeles fabricados con bronces con 23% Sn.

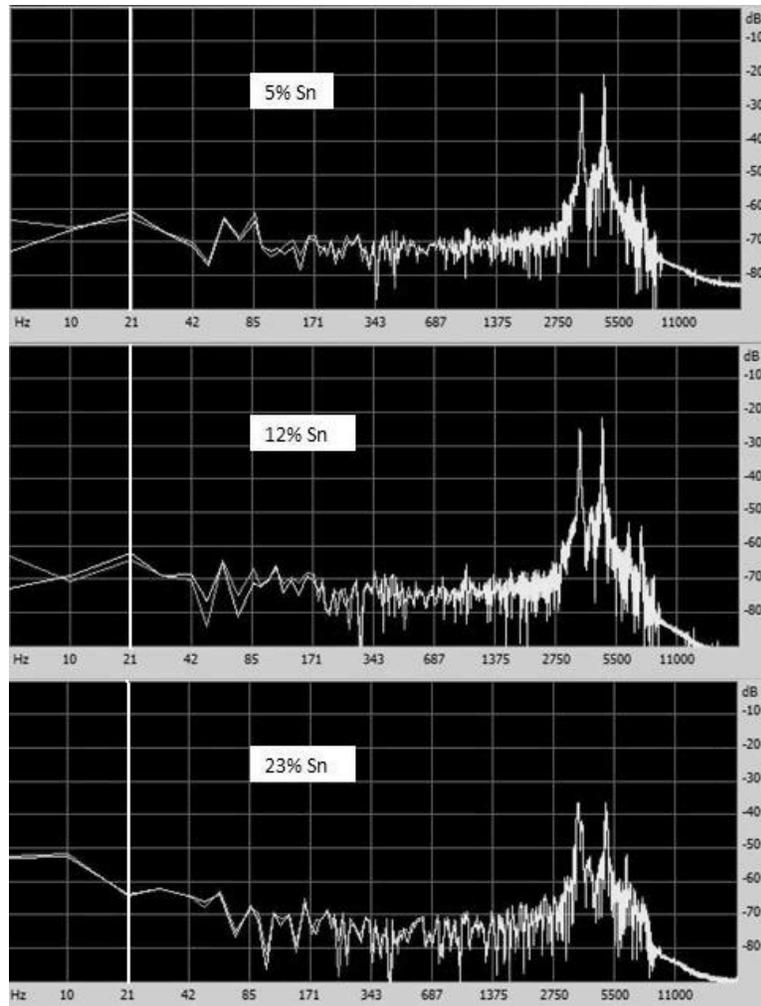


Figura 9. Infrasonido en aleaciones Cu-Sn.

Además, se ha resaltado la importancia que tiene el infrasonido en una gran cantidad de rituales (Tuzin, 1984); en todas las civilizaciones, las ceremonias religiosas son multisensoriales, por lo que tanto el color, como el brillo y el sonido ocupan un lugar preponderante en su realización. La importancia del infrasonido en los rituales es debido a que la visión se ve afectada por él, además de que todo

el cuerpo percibe la vibración del sonido (Fernández Valencia, 2007). Esto facilita la inducción al estado de trance y la predisposición a experimentar una percepción visual distorsionada, así como desasosiego generalizado aunado a una gran cantidad de otros elementos- como el uso de psicotrópicos y bebidas alcohólicas-, produce una sensación de mayor cercanía con un dios mediante la otredad: el alejamiento del comportamiento usual de los sacerdotes (Fernández Valencia, 2007).

El ultrasonido ha sido poco estudiado como factor para alterar el comportamiento humano; sin embargo, estudios posteriores pueden demostrar la importancia de su presencia en las aleaciones de Plomo (tabla 9a) y 5% Sn; sin embargo, es posible que este comportamiento hiciera aún más atractivo el uso de estas aleaciones para fabricar cascabeles.

## 8. Observaciones importantes

➤ Para las aleaciones Cu-Sn:

- a) El tamaño del EDS aumenta conforme aumenta la presencia de  $\alpha$  a la misma velocidad de solidificación.
- b) El brillo tiende a aumentar conforme aumenta la cantidad de estaño.
- c) Entre mayor sea la cantidad de estaño, mayores serán los valores de RGB.
- d) Si existe menos de 12%Sn, y el tamaño del EDS aumenta, también aumentarán los valores de RGB.
- e) Si existe más del 12%Sn, y el tamaño del EDS aumenta, los valores de RGB disminuirán.
- f) Existen relaciones entre el contenido de aleante y el contenido de elemento aleante: una tendencia con el color rojo del espectro y correlaciones con los colores azul y verde:

$$G = -0.318(\%Sn)^2 + 7.205\%Sn + 60.79 \quad R^2 = 0.996$$

$$B = -0.264(\%Sn)^2 + 5.828\%Sn + 57.87 \quad R^2 = 0.999$$

- g) El color depende del contenido de elemento aleante.
- h) Se confirmó que existe una tendencia, reportada en trabajos anteriores como correlación (Del Pilar y Fuentes, 2006), entre el valor del brillo y el EDS,

$$B = 1.314 EDS + 32.71 \quad R^2 = 0.9$$

- i) Entre mayor sea la velocidad de solidificación (menor tamaño de EDS) para la aleación con 12% Sn, los valores de HSB serán menores.
- j) Para las aleaciones con hasta 12%Sn, a mayor velocidad de solidificación, es decir, menor tamaño de EDS, los valores de HSB serán mayores.
- k) Existen correlaciones entre valores de HSB y el contenido de elemento aleante:

$$H = 1.32\%Sn + 5.099 \quad R^2 = 0.996$$

- l) Para el intervalo entre 0 y 12% Sn existe una correlación lineal entre el brillo y el contenido de estaño:

$$B = 0.663\%Sn + 41.04 \quad R^2 = 0.997$$

- m) No se observa ninguna correlación entre los contenidos de microconstituyente  $\alpha$  y la intensidad ni frecuencia del sonido;
- n) el sonido fundamental depende únicamente del contenido de aleante.
- o) En las aleaciones con 5% y 12% existe infrasonido, aunque más cercano al espectro audible que en las Cu-Pb.
- Para las aleaciones Cu-Pb:
- a) Conforme aumenta el contenido de plomo, la saturación disminuye y el brillo aumenta imperceptiblemente, aunque el espectro ensayado no es suficiente para determinar tendencias o correlaciones;
- b) El cambio de valores de color (RGB) es prácticamente imperceptible para los contenidos de aleante trabajados.
- El contenido de elemento aleante determina la frecuencia del sonido pero no la intensidad.
- En la aleación con 2.4%Pb se producen infra y ultrasonidos.
- En la aleación con 4.2 % Pb se producen ultrasonidos.

## 8.1 Inferencias

- La poca armonía era un aspecto importante en los cascabeles usados en los ritos mesoamericanos; además, la presencia de infra y ultrasonidos afectaba al participante en una ceremonia religiosa, para sentir cercanía con la divinidad en cuestión. Esto explica también el amplio uso de los bronce al plomo por los mexicas, cuya actividad principal era la guerra.
- Se cree que las aleaciones Cu-Sn se fabricaron con el propósito de simular aspectos relevantes del aspecto sagrado de la vida, pues el color puede entenderse como signo. La de 5% el amanecer, ocaso, eclipses lunares. La de 12% el oro, el Sol y el maíz (ver página 20, el mito del Sononusco). La de 23% podría ser por el color de la luna cuando atardece o amanece.

Además, las aleaciones utilizadas para cascabeles (5% y 12%) producen infrasonido, y alto brillo.

- Es posible que una parte importante de los ritos necesarios en la producción metalúrgica era la occisión ritual; esta debía llevarse a cabo durante las fiestas de Xipe, como se plantea en el marco teórico.
- Aunque los valores de RGB y HSB en teoría son independientes, existen relaciones entre ellas; esto probablemente debido al uso de computadoras como herramientas.
- La tecnología mesoamericana está en la mayor parte de los casos relacionada directamente con los rituales que se practicaban para cualquier actividad; es decir, a lo sagrado.

## 9. Conclusiones

- Los comportamientos valiosos para la cultura mesoamericana en relación a los objetos metálicos eran:

Tabla 11. Resumen de comportamientos valiosos de acuerdo al objeto.	
<b>Objetos metálicos encontrados.</b>	<b>Comportamientos Valiosos (en orden de importancia).</b>
<b>Zona de Occidente</b>	
Cascabeles.	Infrasonido. Disonancia. Brillo. Color.
Puntas de lanza y flecha*, alambres, cinceles*, bastones*, mangos*, cascos*, escudos*, pectorales*, máscaras, platos, orejeras, narigueras, anillos de sección redonda y rectangular, collares, pinzas*.	Brillo. Color.
Anzuelos*, punzones*, agujas, buriles*, azadas*, vasos*, hachas-moneda, diademas, coas*, pendientes, gargantillas, aretes, brazaletes.	Color. Brillo.
<b>Zona Centro</b>	
Cascabeles.	Infrasonido. Disonancia. Brillo. Color.
Orejeras, anillos, hachas-moneda.	Brillo. Color.
Agujas.	Color.
Espejos.	Brillo.
Polvo de Oro.	Color. Brillo.

\*Aunque el uso de estos objetos como suntuarios no se conoce, es probable que solo fueran usados para rituales.

El color era importante pues se relacionaba directa o indirectamente el color del objeto con mitos y ritos; en Occidente se conocía la manera de cambiarlo a voluntad (por el contenido de elemento aleante).

El brillo acercaba a todos los participantes de algún rito con la deidad representada, principalmente el Sol y la Luna; los tarascos sabían de qué modo producir mayor o menor brillo (variando el tamaño del EDS y el contenido de elemento aleante), y los mexicas sabían la manera de pulir las aleaciones de plomo para fabricar espejos.

El sonido, pues facilitaba una experiencia multisensorial en las ceremonias y afectaba la percepción de la realidad en los participantes; los mexicas y los tarascos conocían la manera de producir infra y ultrasonido para afectar el comportamiento humano, aunque no se conoce el efecto del ultrasonido; también se buscaba la disonancia del sonido (como en el caso de la aleación con 5 %Sn).

Estos comportamientos permitían a los mesoamericanos sentirse cerca de sus deidades.

## 10. Bibliografía

1. Cockrel, Bryan; Salas, Guillermo, "Minds and hands at work: Reconstructing the metallurgy of ancient Mesoamerica", *Archaeological Review from Cambridge*, Pp. 9-26, 2012.
2. Salas, G., Ramírez, J., and Noguez, M. 2006. "The sacred in Mesoamerican materials". *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society* 58(5): 44–47.
3. Salas, Guillermo; Ramírez, José; Noguez, María, 2001 "Aleaciones y objetos metálicos mesoamericanos".
4. Fernández Manzano, Julio; Lull, Vicente, "Arqueometalurgia del bronce: introducción a la metodología de trabajo", Valladolid: Universidad de Valladolid, Secretaria de Publicaciones e Intercambio Científico, 1998.
5. Hosler, Dorothy, "Los sonidos y colores del poder: la tecnología metalúrgica sagrada del occidente de México", México: El Colegio Mexiquense, 2005.
6. Pilar Lagunas, Juan del; Fuentes Castillo, Isaac, Tesis de Licenciatura "Fabricación y obtención de bronce mesoamericanos" 2009.
7. López Austin, Alfredo, "El conejo en la cara de la luna: ensayos sobre mitología de la tradición mesoamericana", México, D.F.; Ediciones Era: Instituto Nacional de Antropología e Historia: CONACULTA, 2012.
8. López Austin, Alfredo, "Los mitos del tlacuache: caminos de la mitología mesoamericana", México, D.F.: Alianza, 1990.
9. López Austin, Alfredo, "Hombre-dios: religión y política en el mundo náhuatl", México, UNAM, Instituto de Investigaciones Históricas, 1989.
10. Séjourné, Laurette, "Cosmogonía de Mesoamérica", México, CONACULTA, 2004.
11. Chávez Barragán, Estefanía, "La ciudad y sus autores: el diálogo y la comprensión como alternativas de cambio para una mejoría de la imagen urbana", Tesis Doctoral, 2009.
12. Malinowski, Bronislaw, 1884-1942, "Magic: Science and religion and other essays", Garden City, New York, Doubleday, c1948.

13. Fraenza, Fernando; Perié, Alejandra; Yonahara, Sergio, “¿Cómo vemos?: una introducción a la visión de la forma y el color”, Córdoba, Argentina: Editorial Brujas, 2013.
14. Guild, John; Wright, William, “Visión, Luz y Color”, U. de Cantabria, Departamento de Ingeniería de Comunicaciones, 2006, <http://personales.unican.es/perezvr/pdf/Vision%20Luz%20y%20Color.pdf>.
15. Florescano Mayet, Enrique; Sancho y Cervera, Jaime; Pérez Gavilán Arias, David, “Las sequías en México: historia, características y efectos”, Comercio Exterior, vol. 30, núm. 7, México, julio de 1980, pp. 747-757.
16. Fernández Christlieb, Federico; Urquijo Torres, Sergio, “Los espacios del pueblo de indios tras el proceso de congregación 1550-1625”, Investigaciones Geográficas, agosto, número 60, UNAM, México, DF, Pp. 145-158, 2006.
17. Scott, David; Meyers, Pieter, “Archaeometry of Pre-Columbian sites and artifacts”, UCLA Institute of Archaeology and the Getty Conservation Institute, Los Angeles, California, USA, 1992.
18. Scott, David, “Metallography and Microstructure of ancient and historic metals”, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, California, USA, 1991.
19. Lechtman, Heather; “La tecnología en el mundo andino. Tomo 1”, UNAM, México, DF, 1981.
20. Tuzin, D. 1984. “Miraculous Voices: The Auditory Experience of Numinous Objects”. *Current Anthropology* 25(5): 579-596.
21. Papadimitropoulos, Panagiotis; “Psychedelic Trance: ritual, belief and transcendental experience in modern raves”. *Durham Anthropology Journal*, Volume 16(2) 2009: 67-74, 2009.
22. Fernández Valencia, Diana, “Infrasound and its effects on humans”, Faculty of Architecture, Design and Planning, U. of Sydney; Spatial Audio, DESC9137, Semester 1 2007. Graduate Program in Audio and Acoustics

## **Anexo I. Preparación metalográfica**

La preparación metalográfica de las probetas se llevó de la siguiente manera:

1. Corte transversal de las probetas.
2. Desbaste con lija 80, 240, 320, 400 y 600.
3. Pulido con paño de algodón usando alúmina de  $1\mu\text{m}$  como abrasivo.
4. Ataque químico: las piezas de Cu-Pb se atacaron con picral, mientras que las de Cu-Sn con una solución de cloruro férrico (2g  $\text{FeCl}_3$ , 5mL HCl, 30mL  $\text{H}_2\text{O}$ , 60mL de etanol o metanol). El ataque duró el tiempo necesario (de acuerdo a la pieza varió entre 5 segundos, para la aleación Cu-23% Sn, y 15 segundos, para la de Cu-4.2% Pb) para que se revelara la estructura.