

Pontificia Universidad Católica del Perú

Facultad de Ciencias e Ingeniería



Aportes de las técnicas de análisis químico en el estudio de monedas

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE
BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN QUÍMICA**

Autor:

Ernesto Alonso Aguirre Cuba

Asesor:

Dr. Luis Ortega San Martín

LIMA-PERÚ

2019

Resumen

El presente estudio se centra en la recopilación de información acerca de estudios numismáticos alrededor del mundo, así como de los realizados en el Perú. Se observa que los estudios numismáticos realizados a través de técnicas de análisis químico, en su mayoría, permiten estudiar las monedas sin generar daños visibles y obtener datos de su composición elemental superficial que se pueden relacionar con etapas económicas de la sociedad que acuñaba dichas monedas, la procedencia de estas, el tipo de acuñación, la diferenciación entre una moneda verdadera de una falsa, entre otros. Sin embargo, estos estudios presentan una dificultad al poder analizar el núcleo de la moneda de manera apropiada debido un fenómeno denominado enriquecimiento superficial que consiste en el incremento composicional de un metal en la superficie respecto a la composición real del núcleo de la moneda.

En el caso del Perú, no se han realizado muchos estudios numismáticos apoyados por un estudio químico salvo unos estudios realizados sobre monedas coloniales, monedas de uno y dos céntimos (1950-1965), y monedas de Sol de plata de 9 décimos (1863-1917). Gracias a estos estudios se ha podido observar que hubo un envilecimiento en las monedas de uno y dos céntimos mientras que en el caso de las monedas de Sol de plata se realizó un análisis cuantitativo en el cual se observó que la composición superficial de estas estaba alrededor de 97-98 % en peso de plata que no va acorde a la norma monetaria de esa época, además de la presencia de elementos diferentes a la plata y cobre. La presencia de estos elementos, así como la diferencia de la composición de plata hallada respecto a la teórica da pie a una nueva investigación.

Índice de Contenido

Resumen	i
Índice de Figuras	iii
Índice de Tablas	iv
1. Introducción	1
2. La moneda	4
2.1 Breve historia de la moneda metálica	4
2.2. Metales utilizados para la acuñación de monedas	6
2.3 Las alteraciones de las monedas, aportes históricos	6
3. Estudios analíticos de monedas y sus aportes a la numismática	10
3.1 Estudios de envilecimiento	13
3.2 Estudios de procedencia	17
3.3 Estudios diversos con otras aplicaciones específicas	20
3.4 El enriquecimiento superficial y los problemas del análisis superficial de las monedas.	21
4. Breve resumen de la acuñación monetaria en Perú y los estudios analíticos realizados	24
4.1 Estudios analíticos de monedas peruanas	28
5. Conclusiones	30
6. Bibliografía	32

Índice de Figuras

Figura 1: Monedas acuñadas durante el reinado del rey Croesus.....	4
Figura 2: Microestructuras de dos aleaciones de plata-cobre.	22
Figura 3: Mapa de Sudamérica con los territorios actuales con la ubicación de los centros mineros en la época del virreinato del Perú.	25
Figura 4: Monedas de plata de Sol.....	27



Índice de Tablas

Tabla 1: Técnicas analíticas para el estudio de monedas.....	11
Tabla 2: Casos de envilecimiento o degradación de la moneda	16
Tabla 3: Estudios de procedencia de monedas	19
Tabla 4: Monedas acuñadas y utilizadas en la época colonial del Perú (1524-1824).....	25



1. Introducción

El dinero es esencial para el funcionamiento de la economía moderna como medio de cambio, unidad de cuenta y medio de acumulación. El dinero como medio de cambio hace alusión al uso de este para darle valor a un servicio o bien, ya que sin el dinero las personas adquirirían estos mediante el trueque. Se sabe que el trueque sigue utilizándose en economías tradicionales en Asia, África y América Latina, sin embargo, el trueque se vuelve más difícil de mantener en una economía más globalizada o generalizada debido a que este está ligado a la conveniencia de intercambiar un servicio o producto por otro que se necesite o se desee, pero llegar a un consenso puede tomar un tiempo prolongado o no ocurrir. En cambio, con el uso del dinero se facilitan este tipo de transacciones, ya que con este se puede colocar un precio definido a cierto bien. Adicionalmente, el dinero sirve como unidad de cuenta debido a que proporciona un medio para comparar bienes y servicios. En nuestros tiempos, la unidad de cuenta es la moneda de cada país: el dólar en Estados Unidos, la libra en el Reino Unido, etc. Por último, el dinero como medio de acumulación hace referencia a que este se puede guardar y acumular, y que no perderá su valor a través del tiempo, aunque este se puede ver afectado por otros procesos económicos como la inflación y la deflación. De los usos que se tiene del dinero, el más destacable es como medio de cambio debido a que presenta un valor, ya sea intrínseco por su composición, o dado por un organismo estatal.^{1,2}

El dinero tiene ciertas características como durabilidad, divisibilidad, portabilidad, uniformidad, aceptabilidad y, además, es un recurso limitado. En consecuencia, no hay muchos objetos que puedan usarse como dinero, aunque en la antigüedad se usaron desde joyas, animales, alimentos, entre otros, como formas de dinero. Con el paso del tiempo se vio que ninguno de ellos cumplía las características necesarias y es por eso que acaba apareciendo la moneda como una pieza metálica, comúnmente circular, que está compuesta por un metal, aleaciones de estos u otros materiales, cuyo valor es asignado y garantizado por la autoridad

que las emite.^{2,3} Su éxito se debió en gran medida a que se le asignaba un valor predeterminado, y en base a este valor se pueden realizar cuentas y transacciones, agilizando y facilitando la compra y venta de bienes y servicios.²

El hecho de que la moneda sea metálica y pueda contener más de un elemento facilita la asignación de un valor intrínseco a las monedas y esto permite su alteración por los entes encargados de la emisión monetaria quienes pueden ajustar los parámetros (composición, tamaño, peso) en base a las necesidades monetarias. Este tipo de modificaciones han sido muy comunes en diferentes sociedades de todo el mundo en el pasado y muchos de ellos han sido documentados en la bibliografía histórica y numismática. No obstante, muchos de estos cambios solo han podido conocerse en detalle, o incluso refutados, mediante modernos estudios analíticos de monedas. De ahí surge la importancia actual de llevar a cabo el análisis composicional de las monedas, que nos puede otorgar información sobre la historia monetaria, política y/o geográfica de la época en la cual circularon, las técnicas artísticas realizadas en estas, las técnicas de acuñación, la procedencia del metal utilizado para la acuñación, la economía de esa época, las formas de comercio, las costumbres, entre otros aspectos.⁴ La composición química de las monedas puede ser estudiada mediante técnicas analíticas. Con el uso de estas técnicas se han observado alteraciones del contenido de plata en monedas antiguas, como los denarios romanos tanto republicanos⁵ como imperiales,⁶ monedas visigodas y musulmanas en la península ibérica,⁷ monedas medievales de Inglaterra,⁸ Francia, Serbia,⁹ etc.

En el Perú se han realizado numerosos estudios sobre su historia monetaria, historia de las monedas, la economía de diferentes épocas, la forma de comercio, etc. Sin embargo, apenas existen estudios científicos, especialmente desde el punto de vista analítico, acerca de las monedas acuñadas. Solo, recientemente, se han realizado dos estudios enfocados en amplios grupos de monedas de diferentes épocas. El primero de ellos estudió la evolución cronológica de la composición química de las monedas de “sol de oro” (fabricadas con aleaciones de zinc

y cobre) y arrojó conclusiones interesantes, especialmente en lo referente a las monedas de uno y dos centavos acuñadas desde 1950 hasta 1965.¹⁰ El segundo de ellos se enfocó en el análisis composicional de las monedas de Sol de plata (monedas de 90% en peso de plata y 10% de cobre) acuñadas entre 1863-1917 y dejó abiertas varias posibilidades de investigación relacionadas,¹¹ que sientan las bases para la presente investigación académica.



2. La moneda

2.1 Breve historia de la moneda metálica

De acuerdo a los registros existentes, las primeras monedas en acuñarse fueron las que se emitieron en el reino de Lidia, actual Turquía, alrededor de los siglos VIII y VII a.C.¹² Estas monedas tenían una composición en base a un mineral llamado electrum, que es una aleación de oro y plata con cantidades pequeñas de otros elementos (cobre, trazas de estaño, plomo y hierro). No obstante, el contenido de oro en este mineral podía variar desde 65 % a 85 % por lo que las monedas no necesariamente tendrían el mismo valor que les otorgaba la autoridad emisora, lo que podía llevar a una manipulación de la concentración de oro en las monedas mediante la adición de metales menos nobles o la remoción de oro. Debido a esto, en el reinado del rey Croesus (561 – 546 a.C.) se realizó una reforma monetaria en el reino de Lidia, que tuvo un gran impacto en la difusión de la moneda en el mundo antiguo, la cual consistió en cambiar las monedas de electrum por un sistema monetario basado en monedas de oro y monedas de plata de manera que se tuviera una mayor uniformidad y que todas tuvieran el valor que les otorgaba el reino de Lidia. Esto actuó como base para el desarrollo del sistema monetario de la Grecia Antigua, así como el del imperio persa.^{12,13} En la figura 1 se pueden observar las monedas acuñadas durante el reinado del rey Croesus.



Figura 1: Monedas acuñadas durante el reinado del rey Croesus. Las monedas de la izquierda son las monedas de oro y las de la derecha, las monedas de plata (imagen de Kroll, 2012).¹²

Después de la conquista del reino de Lidia por parte del imperio persa, este último mantuvo el sistema monetario preexistente. No obstante, el rey Darío I de Persia introdujo nuevos tipos de monedas y pesos, aunque se mantuvo el uso de metales puros para su acuñación. Lo importante de este cambio es la introducción de monedas de oro y monedas de plata con un alto grado de pureza del metal noble (en el caso del imperio persa eran el *daric* y *sigloi*, respectivamente). El uso de las monedas en el imperio persa no era de uso expandido en todo su territorio sino concentrado en lo que es Asia occidental, cuyas colonias fueron conquistada por Grecia, lo que hizo que los griegos crearan sus monedas basándose en los *sigloi*.^{13,14}

El uso de la plata como metal de acuñación se popularizó debido a su coste bajo y a su amplia aceptación lo que impulsó que las ciudades estados empezaran a producir su propia moneda de plata. Así como los griegos y persas tomaron como base el sistema monetario de Croesus, los romanos tomaron como base el sistema monetario de los griegos con el cual aparecen monedas como el aureo, denario, entre otros. En la edad media, el uso de monedas se mantuvo y se siguió utilizando metales nobles para darle un valor intrínseco a estas, ya que en tiempos de crisis los entes que emitían dichas monedas podían disminuir el contenido del metal noble o disminuir el tamaño de esta, entre otras medidas.^{13,14}

El uso de la moneda se propagó en gran medida incluso a la caída del imperio romano, ya que los reinos que surgieron después utilizaron como base su sistema monetario. Incluso se conoce que en la Edad Media se seguían utilizando las monedas romanas debido a su valor intrínseco.¹⁵ Por otro lado, en China se tenía un sistema monetario diferente al de Occidente, en el que la composición de sus monedas no se basaba en metales nobles sino metales de menor valor como el cobre, hierro y zinc y su forma también era diferente: aunque eran circulares, en el medio de estas presentaban un hueco cuadrado.¹³

2.2. Metales utilizados para la acuñación de monedas

Se han utilizado metales como el oro, la plata, el cobre, entre otros, para acuñar monedas antiguas debido a su valor intrínseco. El cobre, el oro y la plata son elementos del grupo 11 de la tabla periódica y presentan ciertas características que los hacen valorados, como su brillo, maleabilidad y su estabilidad (no se oxidan con facilidad) en el tiempo. Su extracción, antiguamente, se daba a partir de menas ricas en estos elementos o de estos en su estado puro, siendo estas últimas identificadas por el color característico de cada metal.¹⁶

Una de las características más importantes de las monedas es que deben presentar una alta durabilidad en el tiempo por lo que, normalmente, estas no se acuñan utilizando metales puros (habitualmente blandos) sino aleaciones de estos que presentan una mejora en la dureza, brillo y resistencia. Entre las aleaciones usadas en el pasado para la acuñación de monedas sobresalen las aleaciones de oro y de plata (cada una con diferentes cantidades de otros metales), bronces (con diferente proporción de cobre y estaño) y latones (con cantidades variables de cobre y zinc). En los tiempos más recientes, cuando las monedas son fiduciarias, se usan diferentes tipos de aceros (algunos recubiertos por otros metales como el cobre para dar propiedades anticorrosivas), aleaciones de níquel e incluso aluminio puro.^{17,16,18} Cada ente emisor, no obstante, usa aleaciones particulares y no se puede decir que exista un patrón de aleaciones homogéneo de aplicación en todo el mundo.

2.3 Las alteraciones de las monedas, aportes históricos

Las monedas han sido alteradas a lo largo de la historia debido a que, antiguamente, estas tenían un valor intrínseco en base a la cantidad de metal noble presente. Si la cantidad de este metal en la aleación es alterada se puede generar un cambio sustancial en el valor de la misma, especialmente si se elimina y se sustituye por metales menos valiosos, como suele ser lo habitual. Además de la disminución de la proporción del metal noble en la composición de la

moneda, las alteraciones más comunes que se han realizado incluyen la disminución del tamaño de la misma y el recubrimiento superficial de un núcleo fabricado con metales de poco valor por metales nobles.¹⁹ Se han observado varios casos de este tipo alteraciones en las monedas en toda la historia siendo los casos más conocidos las alteraciones realizadas en las monedas de plata de la época republicana e imperial romana. La época republicana romana, por ejemplo, se caracterizó por periodos constantes de guerra (debido a la expansión de la república) lo cual tuvo asociados periodos de crisis económicas que obligaron a su organismo monetario a disminuir el costo de producción de las monedas sin afectar el valor de las mismas. Esto solo se pudo realizar mediante la manipulación de su composición: se disminuyó la concentración del metal noble utilizada para la acuñación (usualmente plata u oro) sin cambiar el valor nominal con lo que se podían producir más monedas a un coste similar.²⁰

Otro período histórico del cual se conoce que hubo este tipo de alteraciones mediante los hechos históricos fue la Edad Media, ya que en esta época eran bastante comunes los conflictos entre los señores feudales lo cual conllevaba a que estos disminuyeran la fineza (proporción del metal noble en la moneda) de sus monedas para que el adversario se viera afectado, ya que al disminuir la fineza de sus monedas podían acuñar más de estas respecto a sus adversarios lo que generaba disponer de más efectivo para pagar a las tropas y alterar el mercado cambiario en los feudos adversarios.²¹ Uno de estos casos es la depreciación de la moneda que realizó el rey Carlos VII de Francia a principios del siglo XV incrementando así sus ingresos, debido a que su valor nominal era mayor a su valor intrínseco, siendo uno de los factores principales el estar en un periodo de guerra con Inglaterra (Guerra de los cien años).²² Siguiendo una línea cronológica, la siguiente etapa sería la edad contemporánea en la cual también se han reportado alteraciones de las monedas como es el caso de la moneda del reino de Prusia que a inicios del siglo XVI (1519) empezó una guerra con el reino de Polonia de manera que empezó a contratar mercenarios para la guerra. Ante las nuevas necesidades de gasto tuvo que acuñar más

monedas, pero se observó que estas nuevas monedas eran diferentes en forma y contenido a las monedas anteriores: estas eran cuadradas, solo se habían acuñado monedas de alta denominación y se había reducido el contenido del metal noble.²³ Algo similar ocurrió con otro rey de Prusia (1740-1786), Federico II el Grande, durante la guerra de los Siete Años (1756-1763) que también aplicó medidas monetarias que depreciaban su moneda de manera análoga al caso anterior.

Un caso más cercano a la historia peruana es el que sucedió en la ceca de Potosí a mediados del siglo XVII (virreinato del Perú antes de las reformas borbónicas), en el cual se acuñaron monedas con menor contenido del metal noble o menor fineza del que estaba establecido formalmente lo cual forzó su clausura y la re apertura de la Casa de la Moneda de Lima. Esto fue debido a una mala práctica realizada por el ensayador de la ceca para beneficiarse económicamente al disminuir la proporción de plata en las monedas. Al ensayador de dicha ceca, Felipe Ramírez de Arellano, le ayudó el mercader de pastas, Francisco Gómez de la Rocha, y juntos disminuyeron el valor intrínseco de las monedas hasta la mitad.²⁴

Antes de la aparición de técnicas analíticas de análisis químico se podía determinar la composición de las monedas si se utilizaban técnicas de análisis como la densimetría que permite conocer la composición de una moneda metálica a partir de la diferencia de las densidades de los metales que la componen. No obstante, este tipo de instrumentos funcionan muy bien cuando se analizan monedas bimetálicas con composiciones de metales nobles cuyas densidades difieran mucho (el oro y la plata por ejemplo) pero no logra dar un resultado confiable cuando la moneda presenta más de dos metales y menos aún si las densidades de estos metales son bastante similares.²⁵ Es debido a la incertidumbre generada por los instrumentos de este tipo que se requirió de técnicas más confiables como las de análisis químico, que a la vez no fuesen destructivas. Es mediante el uso de estas técnicas que se logra comprobar las leyes o normas monetarias sobre la composición de la moneda y cómo esta

cambia normalmente en épocas de crisis; no obstante, esto no sucede siempre, como se explicará más adelante.



3. Estudios analíticos de monedas y sus aportes a la numismática

Además del punto de vista histórico, también es posible el estudio de las monedas desde la perspectiva científica, especialmente desde el punto de vista del análisis químico. Desde esta perspectiva, una de las características más importantes a determinar en una moneda es su composición, en gran parte debido a que, antiguamente, su valor estaba relacionado con dicha característica que, a su vez, solía estar normada (para garantizar el valor adquisitivo). No obstante, existen muchos otros estudios que se pueden realizar además del análisis de su composición: análisis metalográfico, análisis de fases, densidad, peso, análisis morfológico, etc. Todos estos análisis permiten obtener información variada como puede ser su procedencia (si se compara la composición de las mismas con los metales o minerales de origen), la fineza de la moneda, los cuños que se utilizaron para la acuñación, los procesos de envilecimiento y, también, pueden permitir discriminar una imitación de la época de una moneda verdadera, así como de imitaciones modernas.^{19,26}

Los análisis composicionales de las monedas pueden realizarse empleando diversas técnicas tales como espectroscopía de absorción atómica (AAS)¹⁰, espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS)⁵, espectrometría de masas con fuente de ablación láser acoplada inductivamente (LA-ICP-MS)²⁷, emisión de rayos X inducida por partículas (PIXE)²⁸, difracción de rayos X (XRD)²⁹, análisis de activación de partículas (entre los cuales se encuentran el NAA, análisis de activación de neutrones, el PAA, análisis de activación de protones, y el PGAA, análisis de activación de neutrones gamma rápida)³⁰ y fluorescencia de rayos X (en este caso las modalidades más usadas son ED-XRF, fluorescencia de rayos X de energía dispersiva, WD-XRF, fluorescencia de rayos X de longitud de onda dispersiva, y SEM-EDX, microscopía electrónica de barrido acoplado a un espectroscopio de rayos X de energía dispersiva).^{31,32,33,34,35} Las principales diferencias que existen entre estas técnicas son la cantidad de elementos que pueden ser detectados simultáneamente, la fuente incidente, el grado

de profundidad de análisis y los límites de detección. Son estas diferencias las que el investigador toma en cuenta al seleccionar la técnica o técnicas que vaya a utilizar para analizar las monedas. La principal utilidad de cada técnica y algunos ejemplos aplicados en monedas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Técnicas analíticas para el estudio de monedas

Técnicas de análisis	Información obtenible y carácter del análisis*	Ejemplos	Ref.
AAS	Composición total elemental (D)	Análisis del contenido de cobre en monedas del Perú (1950-1965)	10
LIBS	Composición superficial elemental (ND)	Estudio superficial de los elementos presentes en denarios romanos	5
PIXE	Composición superficial elemental (ND)	Estudio elemental de monedas iraníes antiguas (592-626 d.C)	28
XRD	Análisis composicional superficial, determinación de fases presentes (ND)	Análisis de productos de corrosión en monedas romanas de plata	29
XRF	Composición superficial elemental Puede variar el tipo de detección de rayos X (ED-WD) (ND)	Análisis cuantitativo de monedas de plata de Sol de 9 décimos (1863-1917)	11
SEM-EDX	Análisis morfológico, composición elemental de la zona analizada (ND)	Estudio elemental de monedas otomanas (s.XVI-XVII)	36
LA-ICP-MS	Análisis elemental superficial con diferentes grados de profundidad (ND)	Estudio de monedas de plata del imperio Carolingio	27
Análisis de activación de partículas NAA, PAA, PGAA	Pueden activarse diferentes partículas para el análisis elemental superficial o total (neutrones, protones) (ND)	Estudio de procedencia de monedas acuñadas con metal proveniente de la mina de Potosí. (NAA) Estudio composicional de monedas de oro de la península Ibérica durante la ocupación musulmana (PAA)	25 7
* Para el carácter del análisis se ha considerado que puede ser destructivo, D, si hay que destruir una parte de la muestra, aunque sea mínima, o no destructivo, ND, si el análisis deja a la muestra indistinguible de su estado inicial.			

De todas las técnicas mencionadas, algunas son consideradas no destructivas como la XRF, PIXE, NAA, LIBS y XRD, mientras que otras son necesariamente destructivas como la de

AAS. Es por esta razón que la técnica usada por muchos estudios es la de XRF junto con otras técnicas de análisis no destructivas como NAA y XRD^{7,29} o usando variantes de la misma técnica como SEM-EDX, WD-XRF y ED-XRF valiéndose de la diferente profundidad de análisis que tiene cada una.⁶ Respecto al uso de las técnicas, algunas son más sencillas de utilizar que otras como es el caso de la técnica de XRF que es la técnica más popular en estudios numismáticos. Esto es debido a que esta es una técnica fácil de implementar, permite obtener un espectro rápidamente y, usualmente, no se necesita una preparación previa de la muestra. Además, se tienen diferentes equipos de XRF comerciales disponibles, siendo algunos portátiles o fijos. Los equipos portátiles, como lo dice su nombre, se pueden llevar de un lugar a otro y permiten analizar las muestras en el sitio de estudio sin necesidad de llevar las muestras a un laboratorio como es el caso de los equipos fijos, los cuales, por otro lado, tienen la ventaja de que son más potentes y permiten detectar un mayor número de elementos, y en cantidades más bajas, respecto a los equipos portátiles. Otro factor que puede variar es el tipo de detección, ya que algunos equipos pueden ser sistemas de energía dispersiva (ED-XRF) o de longitud de onda dispersiva (WD-XRF), siendo esta última la que tiene una mejor resolución respecto a la de energía dispersiva. Por otro lado, esta técnica se puede usarse en conjunto con la técnica de microscopía electrónica, acoplándose a un microscopio electrónico de barrido (SEM-EDX). Similar a esta técnica es la PIXE pues también se detectan las emisiones características de los elementos en el rango espectral de rayos X, pero esta lo realiza a través del bombardeo de la muestra con protones acelerados mientras que en SEM-EDX la fluorescencia de rayos X es producida mediante el bombardeo con electrones acelerados. El uso de protones como fuente de excitación permite una mejor resolución de los elementos, así como una disminución de los fenómenos que pueden pasar con los electrones como fuente de excitación. De igual manera, PIXE es una técnica de análisis superficial que puede mejorar su profundidad de análisis con las condiciones de análisis. Se han manufacturado equipos portátiles de esta técnica para el

estudio de pinturas, por ejemplo, pero no se han comercializado estos.^{37,38} La técnica SEM-EDX es, por lo tanto, una opción más habitual.

A diferencia de estas últimas, las técnicas de análisis de activación de partículas detectan los elementos mediante la detección de las radiaciones gamma emitidas por los mismos cuando sus núcleos son activados radiactivamente. La activación de los elementos puede darse por el bombardeo con neutrones o de protones lo cual da el nombre a las diferentes técnicas como NAA y PAA. No obstante, estas técnicas presentan una desventaja: debido a que activan radiactivamente las muestras, estas no pueden ser manipuladas fácilmente después de haber sido analizadas hasta que la radiactividad desaparezca, lo cual limita la aplicación a muestras que después no sean de uso inmediato. Sin embargo, estas técnicas presentan una ventaja frente a las otras y es que pueden analizar la muestra por completo, aunque esto depende de las condiciones de análisis.

A continuación, se desarrollarán los diferentes estudios realizados en monedas con este tipo de técnicas agrupados en función del tipo de información que era buscado a partir del análisis: estudios de envejecimiento, falsificaciones, proveniencia, etc.

3.1 Estudios de envejecimiento

Los estudios enfocados en el envejecimiento de las monedas, es decir, en conocer la posible reducción del contenido de metal noble respecto al valor legal o esperado de la misma, permiten conectar estos cambios composicionales con la situación económica, financiera y política de la época. Entre los casos más llamativos se encuentra el de las monedas romanas de diferentes épocas que han permitido establecer diferentes periodos en los que se ha alterado la composición de la moneda debido a crisis económicas y épocas de conflicto con diferentes regiones.^{5,6} No obstante, estudios de este tipo también han sido realizados con monedas de

diferentes regiones de diversas partes del mundo.^{7,8,9,10,28} En la tabla 2 se muestran algunos ejemplos de dichos estudios y las conclusiones a las que se llegaron.

Se puede observar que para este tipo de estudios se utilizan técnicas con cierto grado de profundidad por lo que algunas técnicas de análisis elementales muy superficiales, como es el caso de la espectroscopia de fotoelectrones inducidos por rayos X (XPS), no son utilizadas aunque esta se ha utilizado en algunos estudios sin proveer información relevante sobre las monedas.³⁹

Usualmente, en estas investigaciones no se realiza una preparación previa de las monedas para ser analizadas debido, principalmente, a que se busca determinar la composición original de la moneda para conocer la fineza real de esta. Además, no se suele usar una sola técnica sino un conjunto de técnicas para poder obtener la mayor cantidad posible de información de la moneda. Un ejemplo resaltable de esto es el caso de la combinación de las técnicas PIXE y SEM/EDX usadas para el estudio de monedas de plata-cobre del imperio otomano (s. XVI-XVII)³⁶: la primera de ellas permitió realizar el análisis elemental de manera sencilla y, la segunda, el análisis morfológico de las monedas junto con un análisis elemental. La unión de estas técnicas permitió determinar la composición elemental del núcleo de las monedas, ya que cada una otorgaba información a distintas profundidades de las monedas.

Otro estudio dónde se han utilizado un conjunto de técnicas analíticas con diferente grado de profundidad de análisis fue el realizado por Klockenkämper y colaboradores⁶ sobre monedas romanas de la época imperial para estudiar el contenido de sus metales. En este estudio se observó una clara reducción de la cantidad de plata en las monedas que se correlacionaba bien con la evolución del imperio romano, sus guerras y sus crisis. El uso de dos técnicas de diferente profundidad (EDXRF y WDXRF, siendo la segunda la que otorga un mayor grado de profundidad de análisis (aproximadamente 30 μm)) permitió un mejor estudio de la evolución

del contenido de plata pues se encontró que estas monedas estaban afectadas por un fenómeno de enriquecimiento superficial que no permitía ver tan claramente el contenido real de plata en las mismas.

Algo que sí varía entre los diferentes estudios es la cantidad de monedas analizadas ya que, normalmente, esto se encuentra sujeto a la disponibilidad de estas. Lo ideal es que haya una gran cantidad de monedas disponible pues en este caso se pueden seleccionar las más representativas estadísticamente, pero no siempre eso es posible y, finalmente se acaba trabajando con el conjunto de monedas disponible (las que se encontraron en una excavación, las disponibles en un museo o las de una colección particular). Usualmente, el rango de monedas con el que se trabaja es entre 100 y 500 monedas, aunque ha habido estudios donde se han analizado una cantidad mayor a las 500 monedas.

Tal como puede observarse en la tabla 2, en la mayor parte de este tipo de estudios se ha observado que existe una correlación entre los cambios composicionales de las monedas y los tiempos de crisis; sin embargo, esto no siempre se da. Un ejemplo es el caso del imperio otomano entre finales del siglo XVI e inicios del siglo XVII durante el cual pasó momentos de crisis económicas y guerras, por lo que un conjunto de investigadores decidió realizar un análisis de un grupo de monedas de plata-cobre que se encontraron en el sitio arqueológico Beçin Kalesi como parte de un tesoro. Aunque la premisa inicial, basada en estudios históricos, era que había habido envilecimiento de las mismas, en este estudio se encontró que la composición de las monedas de plata-cobre a lo largo de este periodo se mantuvo constante en el contenido del metal noble y el único cambio observado fue el tamaño de las monedas: se redujo el tamaño de las mismas y, por lo tanto la cantidad de plata y cobre usada para la acuñación de estas, pero no se modificó la fineza que las caracterizaba.^{36,40}

Tabla 2: Casos de envejecimiento o degradación* de la moneda

Región	Tipo de moneda	Tipo de estudio	Conclusiones	Técnicas	Ref
Roma Antigua	Denario de la época republicana	Estudio de análisis composicional	Reducción del contenido de plata debido a periodos de guerra y crisis políticas.	LIBS XRF	⁵
Roma Antigua	Denario de la época imperial	Estudio de análisis composicional	Reducción del contenido de plata en los periodos de crisis. Además, existió un enriquecimiento superficial de la moneda.	EPMA-ED [#] WD-XRF ^{\$}	⁶
Península Ibérica-Después de la caída de Roma	Dinares	Estudio de análisis composicional	Reducción del contenido de oro debido a la invasión musulmana (periodo de guerra).	PAA [†]	⁷
Península Ibérica-ocupación musulmana	Dinares de Al-Ándalus	Estudio de análisis composicional	Reducción del contenido de oro debido a guerras internas.	PAA	⁷
Inglaterra del siglo XVI	Monedas del reinado del rey Henry VIII	Estudio de análisis composicional y análisis superficial	Reducción del peso de la moneda. Reducción del contenido de plata en la moneda. Existencia de un enriquecimiento superficial de las monedas	SEM-EDX [‡]	⁸
Serbia de la Edad Media (siglos XIV y XV)	Monedas de plata, cobre y zinc	Estudio de análisis composicional	Constancia del contenido composicional de las 3 monedas. Reducción del peso de la moneda de plata debido a una guerra.	WD-XRF	⁹
República del Perú (1950-1965)	Monedas de uno y dos centavos	Estudio de análisis composicional	Reducción del contenido de cobre en periodos de crisis financiera.	XRF AAS	¹⁰
Iran antigua (592-626)	Monedas de plata pertenecientes al reinado de Khosrau II	Estudio de análisis composicional	Reducción del contenido de plata en tiempos de guerra.	PIXE	²⁸
Turquía siglo XVI y XVII	Monedas de plata-cobre del imperio otomano	Estudio de análisis composicional	Mantención de la ley de plata en las monedas en tiempos de crisis. Reducción del peso de las monedas (más pequeñas)	PIXE SEM/EDX	³⁶
República de Venecia (siglo XVI)	Monedas de plata-cobre de Venecia	Estudio de análisis composicional	Reducción progresiva de la ley del metal noble hasta solo tener monedas de cobre	XRD SEM/EDX	³¹

* “Degradación” o “envejecimiento” serían las traducciones más adecuadas de “*debasement*”.

[#]Microsonda de rayos X de energía dispersiva

^{\$}Fluorescencia de rayos X de longitud de onda dispersiva

[†]Análisis por activación de protones

[‡]Microscopía electrónica de barrido acoplado a un ED-XRF

Eso mismo parece ser el caso de los soles de plata de 9 décimos cuya época de circulación (1863-1917) tuvo muchos eventos históricos perjudiciales para la economía del Perú como la crisis del guano, guerra del Pacífico, crisis posguerra, guerra civil, así como la depreciación de la plata a finales del siglo XIX; no obstante, un estudio reciente de la composición de estas monedas¹¹ indicó que la cantidad de plata contenida en las mismas era mayor a la composición teórica. No obstante, en dicho estudio quedó la duda de si la superficie analizada fue en realidad representativa del núcleo de la moneda o si hubo un enriquecimiento superficial en esta, lo cual aún está sin resolver.

3.2 Estudios de procedencia

Además de los estudios de envilecimiento en monedas, el siguiente tipo de estudio más común es el de la procedencia de las monedas.^{33,41} Para dichos estudios se realizan análisis para conocer determinados detalles de su composición, como elementos poco comunes y diferentes de los normalmente esperados en la aleación principal. De esta manera se puede determinar la procedencia de las monedas, ya que los metales refinados que se utilizaban en las cecas podían provenir de diferentes minas, por lo que sus impurezas se convertían en una huella trazable. En consecuencia, una composición definida de impurezas en las monedas de la ceca, en principio, permitiría identificar su procedencia. Estos estudios, se ven facilitados si se conocen las minas que proveían de metal noble a las cecas y la composición de los minerales extraídos, siendo las minas más cercanas a las cecas las primeras que deberían considerarse en una primera aproximación al problema.^{6,35} No obstante, estos estudios pueden verse complicados si en las cecas se fundían metales procedentes de diferentes fuentes.

Por otro lado, también sería posible establecer la metodología de obtención del metal, como en el caso de la plata, cuyos procesos de obtención han cambiado considerablemente en el tiempo.

Por ejemplo, se podría diferenciar el refinamiento de la plata mediante copelación o amalgamación pues este último es un proceso en el cual la plata podría contener trazas de mercurio una vez refinada.^{42,35}

Para un estudio de procedencia es necesario conocer, de preferencia, los elementos que se encuentran en el interior de la moneda, ya que estos son los elementos que no han sido añadidos por el contacto de la moneda con el ambiente, así como posibles impurezas generadas por la corrosión de esta.^{6,43} Por ello, y si es que no se quiere estudiar más a fondo la superficie, se puede realizar una preparación previa de las monedas como una limpieza o “blanqueo”, lo cual tiene cierto carácter destructivo, aunque no afecta a la imagen general de las piezas analizadas. Los métodos de limpieza se pueden proponer de acuerdo a lo que se quiere retirar, por ejemplo, a veces se utiliza una solución de EDTA, alcohol, un baño de ultrasonido con agua, entre otros.^{6,35,39} Por otro lado, si se quiere analizar más a fondo el interior de la moneda, esta puede ser lijada o pulida, pero esto ya sería un proceso completamente destructivo de la misma y, usualmente, en este tipo de estudios se busca la conservación de la moneda. Si no se cuenta con técnicas que puedan analizar por completo la moneda como es el caso de NAA o PAA se utilizan un conjunto de técnicas analíticas superficiales con distinto grado de profundidad de análisis. No obstante, el análisis de la composición del núcleo de la moneda se dificulta cuando se utilizan técnicas analíticas superficiales debido a problemas como el enriquecimiento superficial, del cual se hablará más adelante.

Para los estudios de procedencia, una vez se ha realizado un análisis general de todos los elementos presentes, los datos deben ser procesados mediante un análisis estadístico. En la tabla 3 se muestran casos de estudios de procedencia en diferentes regiones del mundo.³⁵

Tabla 3: Estudios de procedencia de monedas

Región	Tipo de moneda	Tipo de estudio	Conclusiones	Técnicas usadas	Ref.
Turquía contemporánea (1574-1617)	Moneda de plata del imperio otomano	Estudio de análisis composicional	Se logra agrupar las monedas con sus respectivas cecas mediante su composición	PIXE SEM-EDX SRXRF ⁺	³⁵
Austria medieval (siglo XV)	Moneda de plata “Tiroler Kreuzer”	Estudio de análisis composicional	Se logró conectar la composición de la moneda con la ceca de la cual provenía	ED-XRF SEM-EDX PIXE	⁴¹
Bolivia contemporánea (siglo XVI-XVII)	Monedas de plata de la ceca de Potosí	Estudio de análisis composicional	Se logró discriminar que monedas fueron acuñadas en la ceca de Potosí a partir de su composición	NAA	²⁵
Roma Antigua	Denario de la época imperial	Estudio de procedencia mediante isótopos de plomo	Se logró discriminar las monedas respecto a sus cecas mediante el análisis de isótopos de plomo	LA-ICP-MS	⁴⁴
Europa central s. II a.C.	Monedas de oro celtas	Estudio de procedencia mediante isótopos de osmio	Se logró discriminar las monedas respecto a sus respectivas fuentes de oro para su acuñación.	LA-MC-ICP-MS [†]	⁴⁵
Imperio Persa Periodo Arsácida Periodo Sasánida	Monedas de plata persas	Estudio de las fuentes del metal noble y tecnologías de refinación	El contenido de plomo es una característica de la tecnología y calidad de los métodos de refinación. Las monedas del Periodo sasánida contienen plata de mejor calidad respecto a las monedas romanas.	XRF PIXE	⁴⁶

⁺ Técnica de fluorescencia de rayos X utilizando un sincrotrón.

[†] Técnica de espectrometría de masa acoplado a un plasma acoplado inductivamente con ablación láser con multicolector

Como se observa en la tabla 3, en este tipo de estudios es posible rastrear las monedas hasta su ceca o incluso hasta la fuente mineralógica mediante el análisis de los elementos poco usuales en esta, que funcionan como una huella dactilar de su origen.

Otro tipo de análisis que ha resultado ser bastante útil en los estudios de procedencia, es el análisis de isótopos de algún elemento traza abundante (Pb, Os, por ejemplo) que esté presente en la moneda. Las monedas se pueden agrupar mediante la similitud existente en la proporción de los isótopos presentes ya que la proporción de los elementos traza va de acuerdo a la zona de donde se obtuvo el mineral. Esto se debe, principalmente, a que los isótopos radiactivos de algunos elementos presentes en los minerales de metales nobles como el plomo, osmio, entre otros pueden ir desapareciendo debido a que van decayendo y la proporción de sus isótopos se modifica. Esta desproporción entre los isótopos de los elementos puede utilizarse como una característica para determinar la fuente mineralógica del metal, ya que esta puede variar dependiendo de la zona de donde se extrajo el mismo.^{44,45}

3.3 Estudios diversos con otras aplicaciones específicas

Entre el grupo de estudios realizados a las monedas desde el punto de vista analítico, se encuentran los que buscan determinar falsificaciones de monedas. En la antigüedad, por ejemplo, se conoce que la falsificación de monedas de plata más utilizada consistía en la acuñación de monedas usando metales no preciosos que luego eran recubiertas con una fina capa de plata mediante el uso de una amalgama de este metal (amalgama de mercurio). Este es un caso descubierto en monedas medievales del territorio actual de la República Checa mediante técnicas analíticas.⁴⁷ Sin embargo, en un estudio de monedas de la Edad Media en Polonia se observó que pudo darse otro tipo de falsificación mediante un recubrimiento con estaño en vez de plata. Esto pudo ser estudiado gracias a las técnicas superficiales que permitieron diferenciar la superficie y el núcleo de la moneda.

La moneda falsa que no ha sufrido alteración superficial puede ser analizada mediante técnicas de análisis elemental siendo la más usada la técnica de fluorescencia de rayos X (XRF).^{48,49} Por otro lado, en la actualidad también existe la circulación de monedas falsas y estas pueden ser analizadas por las mismas técnicas mencionadas anteriormente. Un estudio de este tipo se realizó sobre monedas peruanas recientes (monedas de 1, 2 y 5 nuevos soles actuales). Se observó que las monedas falsas presentaban una clara diferencia respecto a las verdaderas debido a la menor concentración de los metales con mayor valor, como Cr o Cu, que fueron reemplazados por Zn o Fe.⁵⁰

Finalmente, también se han realizado estudios para conocer la tecnología que se utilizaba para acuñar las monedas. En estos estudios no solo se han utilizado técnicas de análisis elemental, sino que, además, se han usado técnicas de microscopía electrónica como SEM, ya que nos permiten conocer la morfología de la superficie de la moneda de manera que se pueda observar que tipo de cuño se utilizó, por ejemplo. Además, también se podrían conocer los elementos que el cuño pudo haber depositado en la moneda debido a que el cuño se utiliza cuando se tiene la aleación de la moneda lista.^{51,52} Normalmente, en el estudio de monedas con SEM este va acoplado a un espectrómetro de rayos X por energía dispersiva lo que permite obtener una imagen de la morfología de la superficie más el contenido elemental en esta.

3.4 El enriquecimiento superficial y los problemas del análisis superficial de las monedas.

Uno de los principales problemas del análisis superficial de monedas se encuentra en la posibilidad de que la superficie no represente el núcleo de la misma, es decir, la composición de la aleación original. Esto suele ser debido a algún tipo de enriquecimiento superficial. El enriquecimiento superficial es un fenómeno que sucede en la superficie de las aleaciones y puede ser por muchos motivos entre los que se encuentran la segregación de los componentes

durante la fundición, el tratamiento químico o térmico para mejorar el aspecto estético y, finalmente, la corrosión de la superficie.

Los estudios más detallados al respecto se han llevado en monedas de con aleaciones de plata-cobre. Con el paso del tiempo estas han desarrollado una capa superficial (suele ser una capa de óxido de cobre) que puede ser retirada fácilmente con el contacto continuo de estas con las manos. En la figura 2 se puede observar dos aleaciones metálicas de plata-cobre (una de ellas con una aleación 80%Ag-20% Cu y otra con 30% Ag y 70% Cu) que han sido sometidas a escenarios similares por los que pudo pasar una moneda a través de los años.⁵³

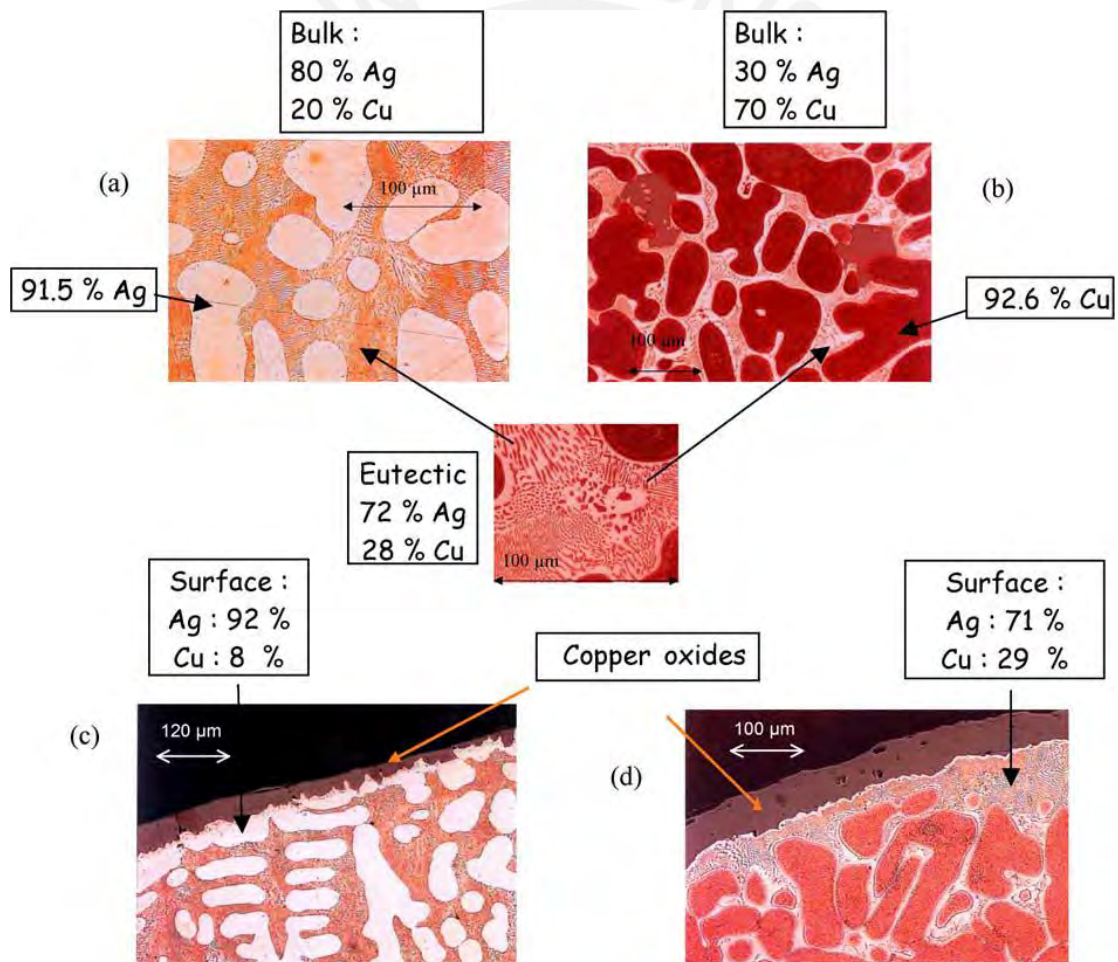


Figura 2: Microestructuras de dos aleaciones de plata-cobre. (a) y (c) núcleo y superficie, respectivamente de la aleación con 80 % de plata. (b) y (d) núcleo y superficie, respectivamente, de la aleación con 30 % de plata.⁵³

Se observa que, por la misma segregación de los componentes de la aleación, se genera una distribución heterogénea de los elementos, así como la formación de una capa de óxido de cobre debido al contacto de cobre elemental en la superficie con el oxígeno del aire. Si las técnicas a utilizar son de análisis superficial hay un problema puesto que, si la capa de cobre se hubiera formado y esta hubiera sido retirada, el análisis mostraría que habría una mayor cantidad de plata de lo esperado respecto al núcleo. Como se observa, el caso más crítico sería el de la aleación de menor contenido en plata que podría dar valores tan errados como de un 70% en metal noble si solo se analiza la superficie.

Uno de estos casos se puede suponer que fue el estudio realizado en el Perú mencionado anteriormente acerca de las monedas de Sol de plata de 9 décimos, donde se encontró que estas monedas poseían un contenido de plata por encima del estipulado por la ley monetaria de dicha época.¹¹ Estos resultados podrían deberse a un enriquecimiento superficial de las monedas y no estar originados en el contenido real de las mismas, lo que remarca la importancia de tener en cuenta el problema de los enriquecimientos superficiales.⁴³

Otra problemática que puede darse en el análisis de monedas está relacionada con el análisis cuantitativo, para el cual se deben tener en cuenta varios factores como homogeneidad de la superficie así como la morfología de la misma para los análisis, puesto que se busca que la superficie sea lo más representativa del núcleo de la moneda.⁵⁴ Otra dificultad bastante usual para el análisis cuantitativo con en este tipo de técnicas es la selección de los estándares, ya que estos deben ser muy similares a las monedas a analizar en su composición elemental, superficie, forma, etc. Esta similitud no siempre es posible y puede darse el caso de que algún elemento aparece en las monedas y no en los estándares (o al revés) lo que dificulta el cálculo cuantitativo pues cada elemento presente en un material a ser analizado afecta a la intensidad del elemento vecino (es lo que se conoce como efecto matriz).

4. Breve resumen de la acuñación monetaria en Perú y los estudios analíticos realizados

En el caso del Perú no hubo moneda metálica hasta después de la conquista iniciada en el siglo XVI, ya que en el mundo prehispánico no existieron monedas sino una economía a base de trueque, en la cual se utilizaban objetos tales como alimentos o artefactos (hachas de cobre, por ejemplo) que circulaban como medio de pago.⁵⁵ Con la llegada de los colonos españoles se introdujeron en el Perú monedas de oro y plata que pasaron por diferentes etapas en la época colonial. En el año 1565 se fundó la Casa de la Moneda de Lima, lo cual fue un gran acontecimiento puesto que con esta institución se pudo empezar a acuñar monedas en el territorio peruano; sin embargo, debido a que las minas de plata se encontraban en Potosí (actual Bolivia), la Casa de la Moneda del virreinato del Perú se mudó a este lugar.^{55,56} De esta forma se generó un monopolio respecto a la acuñación de las monedas en Potosí lo cual era perjudicial para el comercio interno debido a la escasez de monedas, ya que una sola ceca no daba abasto para todo el virreinato. La Casa de la Moneda de Lima reabrió en 1684 y esto tuvo un efecto positivo, ya que impulsó la explotación de las minas de plata de la sierra central peruana como las de Yauli, Huarochiri y Pasco, así también se ayudó a contrarrestar la falsificación de monedas que había ocurrido previamente en la ceca de Potosí.²⁴ El panorama económico mejoró más con las reformas borbónicas realizadas en el siglo XVIII, que pusieron la Casa de la Moneda bajo administración directa del Estado y la modernización de las máquinas de esta institución obteniéndose monedas perfectamente redondas.^{55,57} En la tabla 4 se encuentran los tipos de monedas que existían en la época colonial (1524-1824). En la figura 3 se puede observar un mapa con la ubicación de las minas importantes en el virreinato del Perú.⁵⁸

En la segunda mitad del siglo XVIII el virreinato de Nueva Granada y el virreinato del Río de la Plata se separan del virreinato del Perú lo cual generó un declive económico debido al control del comercio en el océano Atlántico por parte de los nuevos virreinos formados y a la pérdida de gran parte de su producción de plata (principal producto de exportación del virreinato –con un 90% del total-) al quedar las minas del Alto Perú fuera del mismo. No obstante, la producción de plata se recuperó y estabilizó hacia finales del siglo.^{55,56,24,59}

La independencia del Perú en el año 1821 trajo problemas con la política monetaria, ya que la ceca de Lima no pudo producir monedas durante un tiempo (las minas de plata estaban en poder de los realistas y ellos optaron por vender la plata al virrey en vez de al libertador José de San Martín). Una de las soluciones que propuso el libertador fue la introducción del papel moneda, pero este intento falló debido a la poca confianza del pueblo en dinero que no estuviera basado en metales nobles. Al final, el problema fue parcialmente resuelto mediante la acuñación de moneda feble (moneda con menor contenido del metal noble respecto a su valor designado).⁵⁵

La instauración de la República en el año 1824 dio pie a la sustitución de la moneda: el real y el peso se cambiaron por nuevas monedas basadas en el mismo patrón de pesos colonial pero las monedas tuvieron que convivir con las provenientes de países vecinos como es el caso de la moneda feble de Bolivia.⁶⁰ Durante este tiempo de transición se acuñaron monedas en las cecas de Lima y Cusco (en Cusco durante dos periodos, 1824-1845, y 1885-1886).⁶¹

No fue hasta 1863 que en el Perú se logró instaurar el sol de plata, y así introducir un sistema monetario decimal. Aunque en un principio esta moneda tenía que acuñarse en oro y plata, en la práctica se acuñó solo con plata siendo su composición de 90 % plata y 10 % cobre.^{55,56,60,62}

A esta nueva unidad monetaria se le denominó Sol de plata y se dividió en 100 centavos. Los tipos de monedas que se consideraron fueron las monedas de oro para los valores de 20, 10, 5, 2 y 1 sol (estas monedas solo se acuñaron en la ceca de Lima hasta 1872)⁶³, monedas de plata

para los valores de 1 sol, 50 centavos (medio sol), 20 centavos (quinto de sol), 10 centavos (1 dinero) y 5 centavos (medio dinero) y monedas de cobre de 2 y 1 centavos. En la figura 4 se pueden observar las monedas de Sol de plata.¹¹

El sol de plata tuvo dos etapas de acuñación siendo la primera etapa entre los años 1863 y 1917 en la cual se acuñaban con una ley de plata de 9 décimos (90 % de plata) y la etapa en la que se acuñaban con una ley de 5 décimos (50 % de plata) que corresponde a los años entre 1922 y 1935. Por otro lado, la acuñación de soles de plata no fue continua, ya que a veces era interrumpida por la baja disponibilidad de este metal como, por ejemplo, durante la crisis política generada por la guerra del Pacífico. Uno de los factores principales por los cuales se fue dejando de lado el sol de plata fue la devaluación de la plata en el mercado internacional a finales del siglo XIX.^{55,60,64} En el año 1935 se deja de acuñar monedas con composición de metal noble y todas las monedas producidas desde entonces son monedas fiduciarias, es decir, con un valor facial que no se corresponde con el contenido metálico de la misma.⁵⁵



Figura 4: Monedas de Sol de plata.¹¹

4.1 Estudios analíticos de monedas peruanas

A pesar de que existen numerosos estudios de carácter histórico y numismático de las monedas peruanas, no existen muchos trabajos científicos (desde el punto de vista del análisis químico, por ejemplo) de las mismas. Uno de los primeros intentos de estudiar las monedas mediante técnicas analíticas fue realizado por el numismático holandés Kurt Dym Drewin, quien analizó 27 monedas de plata del Perú virreinal acuñadas por la ceca de Potosí por medio de difracción de rayos X en el cual se encontró que la fineza de las monedas era menor a la esperada, lo que se podría deber a un mal manejo de la ceca de Potosí mencionado anteriormente.⁶⁵ El uso de la técnica de difracción de rayos X, no obstante, quizás no fue el más relevante para este estudio pues, aunque permite conocer la composición superficial de un objeto, esto no se hace de manera directa sino indirecta, ya que esta técnica no otorga información acerca de los elementos sino de las sustancias (óxidos, sulfuros, etc) presentes.

Uno de los primeros estudios de monedas mediante técnicas de análisis químico en monedas peruanas fue sobre las monedas de zinc-cobre de uno y dos centavos acuñadas durante los años 1950 y 1965. Según la norma monetaria de esos años, las monedas debían presentar una composición de zinc/cobre de 95:5 en proporción peso/peso, pero se encontró que la composición de cobre, a medida que los años pasaban, disminuía hasta porcentajes por debajo del límite permitido (3 % en peso). Esto significó que hubo un envilecimiento progresivo de las monedas de uno y dos céntimos durante su tiempo de acuñación que no había sido reportado hasta ese entonces.¹⁰

Como se había mencionado anteriormente, también se han realizado estudios de monedas falsas peruanas. El caso mencionado⁵⁰ consistió en analizar un conjunto pequeño de monedas (47 monedas de nuevos soles usas en la actualidad) mediante la técnica de XRF lo que permitió conocer su composición elemental, corroborarla con los datos que ofrece el Banco Central de Reserva del Perú (BCRP) y lograr diferenciar monedas falsas a través de la comparación de la

composición elemental de estas respecto a la referencia. Del análisis, se logró identificar una moneda falsa de 5 soles debido a la diferencia en la composición de cromo en la misma.

Las monedas de sol de plata acuñadas entre 1863-1917 fueron estudiadas desde el punto analítico por primera vez por Marvin Sarango.¹¹ En este estudio se utilizaron dos técnicas analíticas para analizar las monedas de plata, las cuales fueron XRF y XRD. La primera se utilizó para determinar la composición elemental de la superficie de todas las monedas mientras que la técnica de XRD se utilizó para analizar unas pocas monedas para observar que tipo de sustancias se encontraban en la superficie. En este estudio se halló, por un lado, que la composición de plata en las monedas era superior a la composición prevista por la ley monetaria de esa época y, por otro, que algunas de estas presentaban además de plata, cobre y plomo (esperables si la fuente de plata se basaba en minerales de plomo), diferente frecuencia de elementos menos habituales como el mercurio, oro, níquel, zinc, bismuto y cloro, así como, en ocasiones particulares, bario. Es debido a la presencia de estos elementos que se abre la ventana hacia un nuevo estudio de estas monedas que permita determinar (o al menos plantear) el origen de estos elementos, la frecuencia de estos y su posible relación a las fuentes de extracción.

5. Conclusiones y perspectivas de trabajo

Tal como se ha mostrado en el presente trabajo de investigación el estudio de monedas mediante el uso de técnicas analíticas es algo importante y útil, puesto que nos permite conocer más acerca de la historia política y económica de las sociedades que utilizaban estas ya que su composición metálica puede ir variando de acuerdo a eventos que hayan sucedido. No obstante, también se han realizado estudios donde se ha observado que la composición de las monedas se mantuvo intacta en periodos de crisis como guerras a pesar de que fueran esperables cambios como, por ejemplo, una disminución de la cantidad del metal noble para disminuir costos. Estos estudios se han realizado alrededor del mundo en diferentes monedas y con diferentes técnicas analíticas siendo estas de análisis superficial o total. En la mayor parte de los casos se han usado técnicas no destructivas, pero también algunas técnicas destructivas como AAS, aunque el uso de estas últimas no se recomienda a no ser que sea completamente necesario. Por otro lado, en el caso de las monedas peruanas, estas no han sido estudiadas ampliamente con técnicas analíticas.

Los estudios llevados a cabo previamente en el caso de las monedas del Perú abren la posibilidad de ampliarlos. En este sentido, en lo que respecta a las monedas de sol de plata acuñadas entre 1863 y 1917, el estudio previo existente mostró que las monedas no solo presentaban los elementos previstos (plata y cobre) sino también la presencia de elementos como el mercurio, oro, níquel, zinc y bismuto, así como elementos menos usuales como el bromo y cloro. Una opción de trabajo sería, por ejemplo, realizar un procesamiento de datos para agrupar las monedas respecto a su composición y año de acuñación. Además, se abre la posibilidad de estudiar si es que hubo un enriquecimiento superficial en las monedas, ya que en la investigación realizada se encontró que la composición superficial de plata en estas era alrededor del 96 – 98 % en peso, que son valores muy superiores a la norma monetaria de esos años, que indicaba que estas debían tener una composición de plata del 90 % en peso. El estudio

de este fenómeno podría ser mediante la remoción progresiva de la capa superior de una moneda deteriorada, de manera que se pudiera ir analizando la composición elemental de las capas más internas mediante el uso de una técnica analítica como XRF. El corte de una moneda y su análisis por SEM-EDX también sería una alternativa. El estudio composicional debería ser acompañado de un análisis por XRD de manera que se puedan observar las fases en las que se encuentra la plata en las capas más internas.



6. Bibliografía

- (1) O'Sullivan, A.; Sheffrin, S. M. *Economics Principles in Action*; Pearson Prentice Hall: New Jersey, 2003.
- (2) Bank of England. Money in the Modern Economy: An Introduction, by Michael McLeay, Amar Radia and Ryland Thomas of the Bank's Monetary Analysis Directorate. *Quarterly Bull.* **2014**, 54 (1), 4–13.
- (3) Kraay, C. M. Hoards, Small Change and the Origin of Coinage. *J. Hell. Stud.* **1964**, 84 (1964), 76–91.
- (4) García Guerra, E. M. *Las Alteraciones Monetarias En Europa Durante La Edad Moderna*; Arco/Libros, 2000.
- (5) Pardini, L.; El Hassan, A.; Ferretti, M.; Foresta, A.; Legnaioli, S.; Lorenzetti, G.; Nebbia, E.; Catalli, F.; Harith, M. A.; Diaz Pace, D.; et al. X-Ray Fluorescence and Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Analysis of Roman Silver Denarii. *Spectrochim. Acta - Part B At. Spectrosc.* **2012**, 74–75, 156–161.
- (6) Klockenkämper, R.; Bubert, H.; Hasler, K. Detection of Near-Surface Silver Enrichment on Roman Imperial Silver Coins by X-Ray Spectral Analysis. *Archaeometry* **1999**, 41 (2), 311–320.
- (7) Guerra, M. F. The Study of the Characterisation and Provenance of Coins and Other Metalwork Using XRF, PIXE and Activation Analysis. In *Radiation in Art and Archeometry*; Creagh, D. C., Bradley, D. A., Eds.; Elsevier: Amsterdam, 2000; pp 378–416.
- (8) Wang, Q.; Vlachou-Mogire, C.; Gooch, M.; Cook, B. A Metallographic Study of Some Debased Silver Coinage of Henry VIII. *Br. Museum Tech. Res. Bull.* **2015**, 9, 57–63.

- (9) Gržetić, I.; Orlić, J.; Radić, V.; Radić, M.; Ilijević, K. Analysis of Medieval Serbian Silver Coins from XIV and XV Century by Means of Wavelength-Dispersive X-Ray Spectrometry. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms* **2016**, *366*, 161–170.
- (10) Ortega San Martin, L.; Sarango Ramirez, M. K.; Galarreta, B. C. Modern Coin Debasement Discovered by Combined Portable X - Ray Fluorescence and Atomic Absorption Spectroscopy in Peruvian Cent Coins (1950 – 1965). *X Ray Spectrom.* **2019**, *48*, 21–28.
- (11) Sarango Ramirez, M. K. Estudio Cronológico de La Composición Química de Monedas de Sol de Plata Acuñadas Entre 1863 y 1917 Por Medio de Fluorescencia de Rayos X Portátiles, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2018.
- (12) Kroll, J. H. The Monetary Background of Early Coinage. In *The Oxford Handbook of Greek and Roman Coinage*; 2012; pp 1–11.
- (13) Konuk, K. Asia Minor to the Ionian Revolt. In *The Oxford Handbook of Greek and Roman Coinage*; 2012; pp 1–20.
- (14) Van Alfen, P. G. The Coinage of Athens, Sixth to First Century B.C. In *The Oxford Handbook of Greek and Roman Coinage*; 2012; pp 1–17.
- (15) Stahl, A. M. The Transformation of the West. In *The Oxford Handbook of Greek and Roman Coinage*; 2012; pp 1–21.
- (16) Fahlman, B. D. *Materials Chemistry*, 1st ed.; Springer Netherlands, 2007.
- (17) Rohrig, B. The Captivating Chemistry of Coins. *Chem. matters* **2007**, No. April, 14–17.

- (18) The Royal Mint, R. One Penny Coin <https://www.royalmint.com/discover/uk-coins/coin-design-and-specifications/one-penny-coin> (accessed Jul 3, 2019).
- (19) Gierson, P. Numismatic Techniques. In *Numismatics*; Oxford University Press: London, 1975; pp 140–161.
- (20) Burnett, A. *Coinage in the Roman World*; SPINK: London, 1987.
- (21) Metcalf, D. M.; Merrick, J. M. Studies in the Composition of Early Medieval Coins. *Numis. Chron.* **1967**, 7, 167–181.
- (22) Sussman, N. Debasements, Royal Revenues, and Inflation in France During the Hundred Years' War, 1415–1422. *J. Econ. Hist.* **1993**, 53 (1), 44–70.
- (23) Volckart, O. Premodern Debasement: A Messy Affair. *Handb. Hist. Money Curr.* **2018**, 44 (0), 1–22.
- (24) Chamot, E. D. La Primera Ceca Del Cuzco. *Hist. Lima.* **1971**, 67–73.
- (25) Adon, A.; Gordus, J. P. Identification of Potosí Silver Usage in Sixteenth-Seventeenth Century European Coinage through Gold-Impurity Content of Coins. In *Coinage of the Americas Conference*; The American Numismatic Society, 1989; pp 22–42.
- (26) Stewart, B. H. I. H. Medieval Die-Output: Two Calculations for English Mints in the Fourteenth Century. *J. R. Numis. Soc.* **1963**, 3 (7), 97–106.
- (27) Sarah, G.; Gratuze, B.; Barrandon, J. N. Application of Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) for the Investigation of Ancient Silver Coins. *J. Anal. At. Spectrom.* **2007**, 22 (9), 1163–1167.
- (28) Hajivaliei, M.; Mohammadifar, Y.; Ghiyasi, K.; Jaleh, B.; Lamehi-Rachti, M.; Oliyai, P. Application of PIXE to Study Ancient Iranian Silver Coins. *Nucl. Instruments*

- Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms* **2008**, 266 (8), 1578–1582.
- (29) Zwicky-Sobczyk, C. N.; Stern, W. B. X-Ray Fluorescence and Density Measurements on Surface-Treated Roman Silver Coins. *Archaeometry* **1997**, 39 (2), 393–405.
- (30) Schubiger, P. A.; Müller, O.; Gentner, W. Neutron Activation Analysis on Ancient Greek Silver Coins and Related Materials. *J. Radioanal. Chem.* **1977**, 39 (1–2), 99–112.
- (31) Martorelli, D.; Bortolotti, M.; Lutterotti, L.; Pepponi, G.; Gialanella, S. Characterization of the Mistura Alloy Used for Venetian Sesino Coins: 16th Century. *X-Ray Spectrom.* **2019**, 48 (1), 8–20.
- (32) Campaña Prieto, J. M. *Introducción a La Historia Monetaria de Galicia (s. II a.C. - s. XVII d.C.)*; Cebreira Ares, F., Ed.; Labirinto de Paixóns, S.L.: España, 2012.
- (33) Gorghinian, A.; Esposito, A.; Ferretti, M.; Catalli, F. XRF Analysis of Roman Imperial Coins. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms* **2013**, 309, 268–271.
- (34) Pitarch, A.; Queralt, I. Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Analysis of Ancient Coins: The Case of Greek Silver Drachmae from the Emporion Site in Spain. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms* **2010**, 268 (10), 1682–1685.
- (35) Rodrigues, M.; Schreiner, M.; Melcher, M.; Guerra, M.; Salomon, J.; Radtke, M.; Alram, M.; Schindel, N. Characterization of the Silver Coins of the Hoard of Beçin by X-Ray Based Methods. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms* **2011**, 269 (24), 3041–3045.

- (36) Rodrigues, M.; Schreiner, M.; Mäder, M.; Melcher, M.; Guerra, M.; Salomon, M.; Radtke, M.; Alram, M.; Schindel, N. The Hoard of Beçin-Non-Destructive Analysis of the Silver Coins. *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* **2010**, *99* (2), 351–356.
- (37) Pappalardo, L. Portable PIXE System for the in Situ Characterisation of Black and Red Pigments in Neolithic, Copper Age and Bronze Age Pottery. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms* **1999**, *150* (1–4), 576–580.
- (38) Pappalardo, L.; de Sanoit, J.; Marchetta, C.; Pappalardo, G.; Romano, F. P.; Rizzo, F. A Portable Spectrometer for Simultaneous PIXE and XRF Analysis. *X-Ray Spectrom.* **2007**, *36* (5), 310–315.
- (39) Caridi, F.; Torrisi, L.; Cutroneo, M.; Barreca, F.; Gentile, C.; Serafino, T.; Castrizio, D. XPS and XRF Depth Patina Profiles of Ancient Silver Coins. *Appl. Surf. Sci.* **2013**, *272*, 82–87.
- (40) Schindel, N.; Pfeiffer-Taş, Ş. The Beçin Coin Hoard and Ottoman Monetary History in the Late 16th/Early 17th Century. *J. Econ. Soc. Hist. Orient* **2013**, *56* (4–5), 653–671.
- (41) Linke, R.; Schreiner, M.; Demortier, G.; Alram, M. Determination of the Provenance of Medieval Silver Coins: Potential and Limitations of x-Ray Analysis Using Photons, Electrons or Protons. *X-Ray Spectrom.* **2003**, *32* (5), 373–380.
- (42) Egleston, T. The Patio and Cazo Process of Amalgamating Silver Ores. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **1883**, *III*, 1–61.
- (43) Borges, R.; Alves, L.; Silva, R. J. C.; Araújo, M. F.; Candeias, A.; Corregidor, V.; Valério, P.; Barrulas, P. Investigation of Surface Silver Enrichment in Ancient High Silver Alloys by PIXE, EDXRF, LA-ICP-MS and SEM-EDS. *Microchem. J.* **2017**,

131, 103–111.

- (44) Ponting, M.; Evans, J. A.; Pashley, V. Fingerprinting of Roman Mints Using Laser-Ablation MC-ICP-MS Lead Isotope Analysis. *Archaeometry* **2003**, *45* (4), 591–597.
- (45) Junk, S. A.; Pernicka, E. An Assessment of Osmium Isotope Ratios as a New Tool to Determine the Provenance of Gold and with Platinum-Group Metal Inclusions. *Archaeometry* **2003**, *45* (2), 313–331.
- (46) Khademi Nadooshan, F.; Khazaie, M. Probable Sources and Refining Technology of Parthian and Sasanian Silver Coins. *Interdiscip. Archaeol. - Nat. Sci. Archaeol.* **2011**.
- (47) Vlachou, C.; McDonnell, J. G.; Janaway, R. C. Experimental Investigation of Silvering in Late Roman Coinage. *Mater. Res. Soc. Symp. - Proc.* **2002**, *712*, 461–469.
- (48) Ferretti, M. The Investigation of Ancient Metal Artefacts by Portable X-Ray Fluorescence Devices. *J. Anal. At. Spectrom.* **2014**, *29* (10), 1753–1766.
- (49) Hložek, M.; Trojek, T. Silver and Tin Plating as Medieval Techniques of Producing Counterfeit Coins and Their Identification by Means of Micro-XRF. *Radiat. Phys. Chem.* **2017**, *137*, 234–237.
- (50) Olivera, P.; Calcina, E. Caracterización Elemental de Monedas Nacionales de Circulación Actual Mediante Técnicas No Destructivas de Fluorescencia de Rayos X: Informe Preliminar. *Inf. Científico Tecnológico* **2013**, *13*, 13–18.
- (51) Guerra, M. F. Analysis of Archaeological Metals. The Place of XRF and PIXE in the Determination of Technology and Provenance. *X-Ray Spectrom.* **1998**, *27* (2), 73–80.
- (52) Ingo, G. M.; Guida, G.; Angelini, E.; Carlo, G. D. I.; Mezzi, A.; Padeletti, G. Ancient Mercury-Based Plating Methods : Combined Use of Surface Analytical Techniques.

- Acc. Chem. Res.* **2013**, 2365–2375.
- (53) Beck, L.; Bosonnet, S.; Réveillon, S.; Eliot, D.; Pilon, F. Silver Surface Enrichment of Silver-Copper Alloys: A Limitation for the Analysis of Ancient Silver Coins by Surface Techniques. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms* **2004**, 226, 153–162.
- (54) Potts, P. Quantification and Correction Procedures. In *Portable X-ray Fluorescence Spectrometry: Capabilities for in situ analysis*; West, M., Ed.; The Royal Society of Chemistry: Cambridge, 2008; pp 13–36.
- (55) Chocano Mena, M.; Contreras Carranza, C.; Cosamalón Aguilar, J.; De Haro Romero, D.; Luque Luque, J.; Morales Cerón, C.; De la Puente Jerí, P.; Quiroz Chueca, F.; Suárez Espinosa, M. *Historia de La Moneda En El Perú*, IEP.; Contreras Carranza, C., Ed.; BCRP: Lima, 2016.
- (56) Banco Central de Reserva del Perú. Museo Numismático Del Perú. **2000**, 1–13.
- (57) Bernal, A. M. *Dinero, Moneda y Crédito En La Monarquía Hispánica*, MARCIAL PO.; Fundación ICO: Madrid, 2000.
- (58) Brown, K. W. *A History of Mining in Latin America*; Johnson, L. L., Ed.; DIALOGOS: Albuquerque, 2012.
- (59) Fisher, J. Mineros y Minería de Plata En El Virreinato Del Perú 1776 - 1824. *Hist. Lima.* **1979**, III (2), 57–69.
- (60) Flatt, H. P. *The Coins of Independent Peru Volume II: 1858-1917*; Haja Enterprises Terrel: Texas, 1994.
- (61) Yábar Acuña, F. *Las Últimas Acuñaciones Provinciales 1883 -1886 Las Casas de*

Moneda de Cuzco y Arequipa Después de La Guerra Del Pacífico; Impresora
Amarylis: Lima, 1996.

- (62) Flatt, H. P. The Transitional Coins of Peru. *Museum Note (American Numis. Soc.* **1987**,
32, 169–180.
- (63) Fishman, C. *Monedas Del Perú de 1751 a 1978*, 2nd ed.; Numismática Libertad: Lima,
1979.
- (64) Alfageme, A.; Gálvez, J.; Ponce, L.; Troncoso, R. *De La Moneda de Plata Al Papel*
Moneda: Perú 1879-1930; Banco Central de Reserva del Perú, 1992.
- (65) Dym Drowin, K. Contenido de Plata Fina de Algunas Monedas Hispano-Americanas.
Numismatica **1988**, 37, 25–28.

