



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LA EXTRACCIÓN DE METALES Y  
RECUPERACIÓN DE COBRE EN TARJETAS DE DISPOSITIVOS MÓVILES DESCARTADOS**

**Sindy Francelly Vásquez Bran**

Asesorado por el Ing. Qco. M.Sc. Víctor Manuel Monzón Valdez  
Co-asesorado por la Licda Q., M.Sc. Ingrid Lorena Benítez Pacheco

Guatemala, octubre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LA EXTRACCIÓN DE METALES Y  
RECUPERACIÓN DE COBRE EN TARJETAS DE DISPOSITIVOS MÓVILES DESCARTADOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA  
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**SINDY FRANCELLY VÁSQUEZ BRAN**

ASESORADO POR EL ING. VICTOR MANUEL MONZON VALDEZ  
CO-ASESORADO POR LA LICDA INGRID LORENA BENÍTEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Orlando Posadas Valdez
EXAMINADOR	Ing. Gerardo Ordoñez
EXAMINADOR	Ing. Mario José Mérida Meré
SECRETARIA	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LA EXTRACCIÓN DE METALES Y RECUPERACIÓN DE COBRE EN TARJETAS DE DISPOSITIVOS MÓVILES DESCARTADOS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 13 de marzo de 2018.

**Sindy Francelly Vásquez Bran**

Guatemala 04 de febrero de 2021

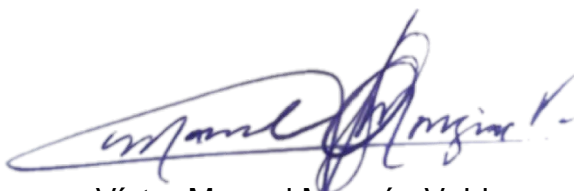
Ingeniero  
Williams Guillermo Alvarez Mejía  
Director  
Escuela Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería - USAC

Respetable Ingeniero,

Esperando que tenga éxitos en sus actividades laborales, por este medio hago de su conocimiento que en mi calidad de asesor del trabajo de graduación de la estudiante **SINDY FRANCELLY VÁSQUEZ BRAN**, quien se identifica con **CUI No. 2105376980101** y **registro académico No. 201113785**, de la carrera **INGENIERÍA QUÍMICA**, he revisado y aprobado el informe final del trabajo de graduación con El título **“EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LA EXTRACCIÓN DE METALES Y RECUPERACIÓN DE COBRE EN TARJETAS DE DISPOSITIVOS MÓVILES DESCARTADOS”**. Por lo que considero que el presente trabajo cumple con los requisitos necesarios para ser presentado ante las autoridades respectivas de la Escuela de Ingeniería Química y lo doy por aprobado.

Por lo tanto, dejo a su consideración que la estudiante continúe con los trámites pertinentes para la defensa y aprobación del mismo ante la terna evaluadora y su persona. Sin otro particular, agradezco su amable deferencia a la presente.

Atentamente



Víctor Manuel Monzón Valdez  
ASESOR  
Ingeniero Químico  
Colegiado activo no. 656



Guatemala 04 de febrero de 2021


Ingeniero  
Williams Guillermo Alvarez Mejía  
DIRECTOR  
Escuela Ingeniería Química  
Presente.

Estimado Ingeniero Williams:

Me dirijo a usted para informarle que a la presente fecha he revisado el informe final del trabajo de graduación titulado: " **EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LA EXTRACCIÓN DE METALES Y RECUPERACIÓN DE COBRE EN TARJETAS DE DISPOSITIVOS MÓVILES DESCARTADOS**", del estudiante universitario **SINDY FRANCELLY VÁSQUEZ BRAN** de la carrera de Ingeniería Química, quien se identifica con **CUI No. 2105376980101 y registro académico No. 201113785** de quien estoy fungiendo como CO ASESOR. Siendo que los aspectos metodológicos del trabajo en cuestión llenan los requisitos técnicos que ameritan su aprobación, sirva la presente para patentizarlo a efecto de que se autorice el trabajo realizado y se proceda a continuar con los trámites subsiguientes.

Sin más por el momento, me suscribo de usted.

Atentamente,

  
Ingrid Lorena Benítez Pacheco  
CO ASESOR  
Licenciada en Química  
Colegiado activo no. 1974  
Licda. Ingrid Lorena Benítez P.  
Química  
Maestría Ciencia y Tecnología  
del Medio Ambiente  
Colegiado No. 1974



Guatemala, 05 de mayo de 2021.  
Ref. EIQ.TG-IF.017.2021.

Ingeniero  
Williams Guillermo Álvarez Mejía  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **070-2017**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL**

Solicitado por el estudiante universitario: **Sindy Francelly Vásquez Bran**.  
Identificado con número de carné: **2105376980101**.  
Identificado con registro académico: **201113785**.  
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.  
En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LA EXTRACCIÓN DE METALES Y  
RECUPERACIÓN DE COBRE EN TARJETAS DE DISPOSITIVOS MÓVILES  
DESCARTADOS**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

**Víctor Manuel Monzón Valdez, profesional de la Ingeniería Química**  
**Ingrid Lorena Benítez Pacheco, profesional de la Licenciatura en Química**

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Adela María Marroquín González  
profesional de la Ingeniería Química  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo

**Adela María Marroquín González**  
**Ingeniera Química Col. No. 1448**







Guatemala, 27 de septiembre de 2021  
Ref. EIQ.190.2021

### Aprobación del informe final del trabajo de graduación

Ingeniera  
Aurelia Anabela Cordova Estrada  
Decana  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Revisado el INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN (TESIS), DENOMINADO **EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LA EXTRACCIÓN DE METALES Y RECUPERACIÓN DE COBRE EN TARJETAS DE DISPOSITIVOS MÓVILES DESCARTADOS** del(la) estudiante Sindy Francelly Vásquez Bran, se conceptúa que el documento presentado, reúne todas las condiciones de calidad en materia administrativa y académica (rigor, pertinencia, secuencia y coherencia metodológica), por lo tanto, se procede a la autorización del mismo, para que el(la) estudiante pueda optar al título de Ingeniería Química.

*“Id y Enseñad a Todos”*

Ing. William G. Alvarez Mejia, M.I.Q., M.U.I.E.  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química

Cc. Archivo  
WGAM/wgam



Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939



NO SALGAS  
QUÉDATE EN  
CASA





**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato  
Facultad de Ingeniería  
24189101 - 24189102  
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

DTG. 465-2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE LA EXTRACCIÓN DE METALES Y RECUPERACIÓN DE COBRE EN TARJETAS DE DISPOSITIVOS MÓVILES DESCARTADOS**, presentado por la estudiante universitaria: **Sindy Francelly Vásquez Bran**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana



Guatemala, octubre de 2021

AACE/asga

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por brindarme fe en todo momento, ayudarme a no desmayar, por sus bendiciones y amor.
- Mis padres** María del Rosario Bran y Juan José Vásquez, gracias por ser quienes me inspiraron a perseguir mis sueños y me impulsaron a ir más allá de mis límites a través de su ejemplo y palabras llenas de sabiduría.
- Mis hermanos** Por la ayuda que recibí de ellos; Karen, Milton, Willy y Werner Vásquez gracias por la paciencia y por aportar su grano de arena para lograr llegar hasta este punto.
- Carlos Castillo** Por ser esa persona que siempre me animó a no desmayar, que conoció cada lágrima y sonrisa a lo largo de mi vida universitaria.
- Santiago Castillo** Por ser la inspiración que necesité y necesitaré, para continuar. Porque nadie como él; que vivió tantas desveladas junto a mi acompañándome en mis tareas.

**Mis sobrinos**

Por la alegría y amor que me dieron, los amo.

**Mis cuñados**

Gracias por estar presentes y pendientes en cada paso importante.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

### **La Universidad de San Carlos de Guatemala**

Por ser la institución que me brindó los estudios, experiencias inolvidables y conocimientos, para formarme como una profesional que puede contribuir con el desarrollo de mi país.

### **Facultad de Ingeniería**

Por ser el centro de enseñanza que inculcó en mí, mejores valores y por ser mi segundo hogar.

### **Mis asesores**

Lcda. Lorena Benítez por el tiempo dedicado, por los consejos profesionales y más aún por los personales, gracias por las ideas y ánimos para culminar mi formación profesional. Ing. Qco. Víctor Monzón por compartir sus conocimientos y experiencias.

### **Amigos de la Facultad**

Por hacer de mi vida estudiantil más amena, en especial a Jennyfer Paiz y Pamela Díaz.



2.4.1.	E-Waste Guatemala .....	17
2.4.1.1.	Forma de trabajo.....	18
2.4.2.	Departamento de Atención Ambiental, Municipalidad de Guatemala, MUNICENTRO.....	19
2.4.3.	Recelca .....	19
2.5.	Generalidades de los metales a recuperar.....	19
2.5.1.	Oro .....	20
2.5.2.	Hierro.....	21
2.5.3.	Plomo .....	23
2.5.4.	Estaño .....	24
2.5.5.	Plata .....	25
2.5.6.	Níquel.....	26
2.5.7.	Cobre.....	27
2.6.	Técnicas de recuperación de metales de interés de tarjetas de circuitos impresos.....	29
2.6.1.	Procesos hidrometalúrgicos .....	30
2.6.2.	Lixiviación.....	31
2.6.2.1.	Ácido sulfúrico.....	31
2.6.2.2.	Cloruro de sodio.....	31
2.6.2.3.	Ácido Nítrico.....	32
2.6.2.4.	Amonio.....	32
2.7.	Determinación cuantitativa de metales por Fluorescencia de Rayos X.....	32
2.7.1.	Descripción de los Espectros Fluorescentes.....	34
2.8.	Métodos de separación química .....	35
2.8.1.	Electrólisis .....	35
2.8.2.	Electrodeposición .....	36
2.8.2.1.	Celda electrolítica .....	37
2.8.2.2.	Electrolito .....	37

	2.8.2.3.	Ánodo.....	37
	2.8.2.4.	Cátodo.....	37
2.9.		Cálculos en procesos electrolíticos .....	38
	2.9.1.	Leyes de Faraday .....	38
		2.9.1.1. Primera ley de Faraday .....	38
		2.9.1.2. Segunda ley de Faraday .....	39
		2.9.1.3. Tercera ley de Faraday de la Electrólisis .....	39
2.10.		Potencial de reducción .....	40
3.		MARCO METODOLÓGICO .....	43
	3.1.	Variables del método.....	43
	3.2.	Delimitación del campo de estudio .....	44
		3.2.1. Etapas de la investigación .....	44
		3.2.2. Ubicación del desarrollo de la investigación .....	45
	3.3.	Recursos humanos disponibles.....	45
	3.4.	Recursos materiales disponibles.....	45
		3.4.1. Materias primas .....	46
		3.4.2. Cristalería .....	46
		3.4.3. Equipo .....	46
		3.4.4. Insumos .....	46
		3.4.5. Reactivos.....	47
		3.4.6. Instrumentos de medición.....	47
	3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa .....	47
		3.5.1. Extracción de metales por método de lixiviación ....	47
		3.5.2. Recuperación de cobre.....	48
	3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	49
	3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	70

3.8.	Análisis Estadístico .....	82
3.8.1.	Regla de decisión.....	83
4.	RESULTADOS.....	85
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	115
	CONCLUSIONES.....	125
	RECOMENDACIONES .....	127
	BIBLIOGRAFÍA.....	129
	APÉNDICE .....	135
	ANEXOS.....	153



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Número de teléfonos inteligentes a nivel mundial desde 2014 hasta 2019.....	8
2.	Composición de un teléfono celular .....	10
3.	Tarjeta de circuito impreso de un teléfono celular .....	11
4.	Crecimiento de la telefonía móvil en Guatemala 1997-2019.....	13
5.	Crecimiento de la telefonía móvil y fija en Guatemala 1997-2019 .....	14
6.	Total de líneas móviles por operador .....	15
7.	Secuencia de las principales etapas de la minería urbana .....	29
8.	Secuencia de producción de rayos X.....	33
9.	Espectro correspondiente a análisis de piezas de tarjetas por fluorescencia de rayos X.....	35
10.	Representación de la celda para la electrodeposición .....	41
11.	Diagrama de proceso de la extracción de metales .....	44
12.	Diagrama de proceso de obtención de cobre.....	45
13.	Comparación de promedios de corridas de porcentajes masas, tres tamaños de tarjeta y relación 3:1 .....	87
14.	Comparación de promedios de corridas de porcentajes masas, tres tamaños de tarjeta y relación 2:2 .....	90
15.	Comparación de promedios de corridas de porcentajes masas, tres tamaños de tarjeta y relación 1:3 .....	93
16.	Comparación del porcentaje masa de Fe para las tres relaciones de agua regia y los tres tamaños .....	94

17.	Comparación del porcentaje masa de Ni para las tres relaciones de agua regia y los tres tamaños.....	94
18.	Comparación del porcentaje masa de Cu para las tres relaciones de agua regia y los tres tamaños.....	95
19.	Comparación del porcentaje masa de Ag para las tres relaciones de agua regia y los tres tamaños.....	95
20.	Comparación del porcentaje masa de Sn para las tres relaciones de agua regia y los tres tamaños.....	96
21.	Comparación del porcentaje masa de Au para las tres relaciones de agua regia y los tres tamaños.....	96
22.	Comparación del porcentaje masa de Pb para las tres relaciones de agua regia y los tres tamaños.....	97
23.	Representación gráfica de la curva de calibración del hierro.....	98
24.	Representación gráfica de la curva de calibración del plomo.....	99
25.	Representación gráfica de la curva de calibración del cobre.....	100
26.	Representación gráfica de la curva de calibración del níquel.....	101
27.	Comparación de promedios de corridas de porcentajes de masas en tres tamaños y relación 3:1.....	104
28.	Comparación de promedios de corridas de porcentajes masas en tres y relación 3:1.....	107
29.	Comparación de promedios de corridas de porcentajes masas en tres tamaños y relación 1:3.....	110
30.	Comparación de promedios de corridas de peso obtenido en electrodeposición para las tres relaciones de agua regia.....	113

## TABLAS

I.	Características principales del oro .....	20
II.	Características principales del hierro .....	22
III.	Características principales del plomo.....	23
IV.	Características principales del estaño.....	24
V.	Características principales de la plata.....	26
VI.	Características principales del níquel.....	27
VII.	Características principales del cobre.....	28
VIII.	Potenciales de reducción de metales y reacción general.....	40
IX.	Descripción de las variables del proceso .....	43
X.	Temperatura de horno mufla para carbonización de tarjeta .....	49
XI.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 3:1, tamaño de tarjeta 0,5cm, corrida 1 .....	50
XII.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 3:1, tamaño de tarjeta 0,5 cm, corrida 2.....	50
XIII.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 3:1, tamaño de tarjeta 0,5 cm, corrida 3.....	51
XIV.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 3:1, tamaño de tarjeta 1,0 cm, corrida 1 .....	52
XV.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 3:1, tamaño de tarjeta 1,0 cm, corrida 2.....	52
XVI.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 3:1, tamaño de tarjeta 1,0 cm, corrida 3.....	53
XVII.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 3:1, tamaño de tarjeta 1,5cm, corrida 1 .....	54

XVIII.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 3:1, tamaño de tarjeta 1,5 cm, corrida 2 .....	54
XIX.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 3:1, tamaño de tarjeta 1,5 cm, corrida 3 .....	55
XX.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 2:2, tamaño de tarjeta 0,5 cm, corrida 1 .....	56
XXI.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 2:2, tamaño de tarjeta 0,5cm, corrida 2 .....	56
XXII.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 2:2, tamaño de tarjeta 0,5 cm, corrida 3 .....	57
XXIII.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 2:2, tamaño de tarjeta 1,0 cm, corrida 1 .....	58
XXIV.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 2:2, tamaño de tarjeta 1,0 cm, corrida 2 .....	58
XXV.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 2:2, tamaño de tarjeta 1,0 cm, corrida 3 .....	59
XXVI.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 2:2, tamaño de tarjeta 1,5 cm, corrida 1 .....	60
XXVII.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 2:2, tamaño de tarjeta 1,5cm, corrida 2 .....	60
XXVIII.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 2:2, tamaño de tarjeta 1,5 cm, corrida 3 .....	61
XXIX.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 1:3, tamaño de tarjeta 0,5 cm, corrida 1 .....	62
XXX.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 1:3, tamaño de tarjeta 0,5 cm, corrida 2 .....	62
XXXI.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 1:3, tamaño de tarjeta 0,5 cm, corrida 3 .....	63

XXXII.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 1:3, tamaño de tarjeta 1,0 cm, corrida 1.....	64
XXXIII.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 1:3, tamaño de tarjeta 1,0 cm, corrida 2.....	64
XXXIV.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 1:3, tamaño de tarjeta 1,0 cm, corrida 3.....	65
XXXV.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 1:3, tamaño de tarjeta 1,5 cm, corrida 1.....	66
XXXVI.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 1:3, tamaño de tarjeta 1,5 cm, corrida 2.....	66
XXXVII.	Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 1:3, tamaño de tarjeta 1,5 cm, corrida 3.....	67
XXXVIII.	Pesos al final de la electrodeposición; relación 3:1, tres tamaños de tarjeta y tres corridas.....	68
XXXIX.	Pesos al final de la electrodeposición; relación 2:2, con tres tamaños de tarjeta y tres corridas.....	69
XL.	Pesos al final de la electrodeposición, relación 1:3, con tres tamaños de tarjeta y tres corridas.....	70
XLI.	Porcentaje masa de hierro obtenido en las tres relaciones de agua regia, con tres tamaños de tarjeta y tres corridas .....	71
XLII.	Porcentaje masa de níquel obtenido en las tres relaciones de agua regia, con tres tamaños de tarjeta y tres corridas .....	72
XLIII.	Porcentaje masa de cobre obtenido en las tres relaciones de agua regia, con tres tamaños de tarjeta y tres corridas .....	73
XLIV.	Porcentaje masa de plata obtenido en tres relaciones de agua regia, tres tamaños de tarjeta y tres corridas .....	75
XLV.	Porcentaje masa de estaño obtenido en tres relaciones de agua regia, tres tamaños de tarjeta y tres corridas .....	76

XLVI.	Porcentaje masa de oro obtenido en tres relaciones de agua regia, tres tamaños de tarjeta y tres corridas.....	77
XLVII.	Porcentaje masa de plomo obtenido en las tres relaciones de agua regia, con tres tamaños de tarjeta y tres corridas .....	78
XLVIII.	Masa teórica de recuperación de cobre en la relación de agua regia 3:1, con tres tamaños de tarjeta y tres corridas .....	79
XLIX.	Masa teórica de recuperación de cobre en la relación de agua regia 2:2, con tres tamaños de tarjeta y tres corridas .....	80
L.	Masa teórica de recuperación de cobre en la relación de agua regia 1:3, con tres tamaños de tarjeta y tres corridas .....	81
LI.	Porcentaje de masa obtenido con relación de agua regia 3:1, en tamaños de tarjeta de 0,5 cm en tres corridas.....	85
LII.	Porcentaje de masa obtenido con relación de agua regia 3:1, en tamaños de tarjeta de 1,0 cm en tres corridas.....	85
LIII.	Porcentaje de masa obtenido con relación de agua regia 3:1, en tamaños de tarjeta de 1,5 cm en tres corridas.....	86
LIV.	Comparación de promedios de corridas de porcentajes masas en tres tamaños de tarjeta y relación de agua regia 3:1 .....	86
LV.	Porcentaje de masa obtenido con relación de agua regia 2:2, en tamaños de tarjeta de 0,5 cm en tres corridas.....	88
LVI.	Porcentaje de masa obtenido con relación de agua 2:2, en tamaños de tarjeta de 1,0 cm en tres corridas.....	88
LVII.	Porcentaje de masa obtenido con relación de agua regia 2:2, en tamaños de tarjeta de 1,5 cm en tres corridas.....	89
LVIII.	Comparación de promedios de corridas de porcentajes masas en tres tamaños de tarjeta y relación de agua regia 2:2 .....	89
LIX.	Porcentaje de masa obtenido con relación de agua regia 1:3, en tamaños de tarjeta de 0,5 cm en tres corridas.....	90

LX.	Porcentaje de masa obtenido con relación de agua regia 1:3, en tamaños de tarjeta de 1,0 cm en tres corridas .....	91
LXI.	Porcentaje de masa obtenido con relación de agua regia 1:3, en tamaños de tarjeta de 1,5 cm en tres corridas .....	91
LXII.	Comparación de promedios de corridas de porcentajes masas en tres tamaños de tarjeta y relación de agua regia 1:3 .....	92
LXIII.	Curva de calibración del hierro.....	97
LXIV.	Curva de calibración del plomo .....	98
LXV.	Curva de calibración del cobre .....	99
LXVI.	Curva de calibración del níquel .....	100
LXVII.	Concentración obtenida con relación de agua regia 3:1, en tamaños de tarjeta de 0,5 cm en tres corridas .....	101
LXVIII.	Concentración obtenida con relación de agua regia 3:1, en tamaños de tarjeta de 1,0 cm en tres corridas .....	102
LXIX.	Concentración obtenida con relación de agua regia 3:1, en tamaños de tarjeta de 1,5 cm en tres corridas .....	102
LXX.	Comparación de promedios de concentraciones de los elementos en tres tamaños y relación 3:1 .....	103
LXXI.	Concentración obtenida con relación de agua regia 2:2, en tamaños de tarjeta de 0,5 cm en tres corridas .....	104
LXXII.	Concentración obtenida con relación de agua regia 2:2, en tamaños de tarjeta de 1,0 cm en tres corridas .....	105
LXXIII.	Concentración obtenida con relación de agua regia 2:2, en tamaños de tarjeta de 1,5 cm en tres corridas .....	106
LXXIV.	Comparación de promedios de corridas de porcentajes masas en tres tamaños y relación 2:2 .....	106
LXXV.	Concentración obtenida con relación de agua regia 1:3, en tamaños de tarjeta de 0,5 cm en tres corridas .....	107

LXXVI.	Concentración obtenida con relación de agua regia 1:3, en tamaños de tarjeta de 1,0 cm en tres corridas.....	108
LXXVII.	Concentración obtenida con relación de agua regia 1:3, en tamaños de tarjeta de 1,5 cm en tres corridas.....	109
LXXVIII.	Comparación de promedios de corridas de porcentajes masas en tres tamaños y relación 1:3.....	109
LXXIX.	Peso práctico de Cu obtenido con relación de agua regia 3:1, para tres tamaños y tres corridas.....	111
LXXX.	Peso práctico de Cu obtenido con relación de agua regia 2:2, para tres tamaños y tres corridas.....	111
LXXXI.	Peso práctico de Cu obtenido con relación de agua regia 1:3, para tres tamaños y tres corridas.....	112
LXXXII.	Comparación de promedios en corridas de peso obtenido en electrodeposición tres relaciones de agua regia.....	113
LXXXIII.	Peso teórico de Cu obtenido por la ecuación de la Tercera Ley de Faraday.....	114
LXXXIV.	Porcentaje de masa obtenido con HCl 37 %, en tamaños de tarjeta de 0,5 cm en tres corridas .....	136
LXXXV.	Porcentaje de masa obtenido con HCl 37 %, en tamaños de tarjeta de 1,0 cm en tres corridas .....	136
LXXXVI.	Porcentaje de masa obtenido con HCl 37 %, en tamaños de tarjeta de 1,5 cm en tres corridas .....	137
LXXXVII.	Promedio de corridas de porcentaje masa obtenido con HCl 37 %, en los tres tamaños de tarjeta.....	137
LXXXVIII.	Concentración obtenida con HCl 37%, en tamaños de tarjeta de 0,5 cm en tres corridas .....	138
LXXXIX.	Concentración obtenida con HCl 37 %, en tamaños de tarjeta de 1,0 cm en tres corridas .....	138



XC.	Concentración obtenida con HCl 37 %, en tamaños de tarjeta de 0,5 cm en tres corridas.....	139
XCI.	Comparación de concentración obtenida con HCl 37 %, en los tres tamaños de tarjeta y tres corridas .....	139
XCII.	Porcentaje de masa obtenido con Vinagre, en tamaños de tarjeta de 1,5 cm .....	140
XCIII.	Concentración para cada elemento obtenida con Vinagre, en tamaño de tarjeta de 1,5 cm.....	140



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>HCl</b>	Ácido clorhídrico
<b>HNO<sub>3</sub></b>	Ácido nítrico
<b>A</b>	Amperios
<b>cm</b>	Centímetro
<b>Cu</b>	Cobre
<b>2:2</b>	Dos partes de HCl y dos partes de HNO <sub>3</sub>
<b>Sn</b>	Estaño
<b>NaOH</b>	Hidróxido de sodio
<b>Fe</b>	Hierro
<b>LAFIQ</b>	Laboratorio de análisis fisicoquímicos
<b>pKa</b>	Medida de acidez
<b>mAh</b>	MiliAmperios por hora
<b>Ni</b>	Níquel
<b>NC</b>	No cuantificable
<b>Au</b>	Oro
<b>Ag</b>	Plata
<b>Pb</b>	Plomo
<b>SIT</b>	Superintendencia de telecomunicaciones
<b>3:1</b>	Tres partes de HCl y una parte de HNO <sub>3</sub>
<b>1:3</b>	Una parte de HCl y dos partes de HNO <sub>3</sub>
<b>V</b>	Voltaje



## GLOSARIO

<b>Agua regia</b>	Solución altamente corrosiva y fumante, de color amarillo, formada por la mezcla de ácido nítrico concentrado y ácido clorhídrico concentrado generalmente en la proporción de una en tres.
<b>Ánodo</b>	Electrodo en el que se produce una reacción de oxidación, mediante la cual un material al perder electrones, incrementa su estado de oxidación.
<b>Cátodo</b>	Electrodo que sufre una reacción de reducción, mediante la cual un material reduce su estado de oxidación al recibir electrones.
<b>Celda electrolítica</b>	Dispositivo utilizado para la descomposición mediante corriente eléctrica de sustancias ionizadas denominadas electrolitos.
<b>Electrodeposición</b>	Tratamiento electroquímico en donde se apegan los cationes metálicos contenidos en el electrolito para ser sedimentados sobre un objeto conductor.
<b>Electrodo</b>	Cuerpo conductor que se halla en contacto con un medio del que recibe o al que trasmite corriente eléctrica.

<b>Electrolito</b>	Es cualquier sustancia que contiene en su composición iones libres, que hacen que se comporte como un conductor eléctrico.
<b>Lixiviación</b>	Proceso en el que un disolvente líquido pasa a través de un sólido pulverizado para que se produzca la disolución de uno o más de los componentes solubles del sólido.
<b>Metales pesados</b>	Es grupo de elementos químicos que presentan una densidad alta. Son en general tóxicos para los seres humanos.
<b>Minería urbana</b>	Es la extracción de metales pesados de los aparatos eléctricos.

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como fundamento establecer y proponer una metodología para evaluar la obtención de los metales oro, plata, hierro, níquel, cobre, estaño y plomo; presentes en las tarjetas de circuito impreso de un teléfono celular, mediante lixiviación ácida y la recuperación de cobre de la solución lixiviada, por el método de electrodeposición.

Se determinó el contenido de cada metal en las tarjetas, para lo cual, previo al ensayo de lixiviación se desarmaron los celulares para extraer las tarjetas de circuitos impresos, las tarjetas se introdujeron en un horno mufla para su carbonización con el fin de remover la cobertura plástica que protege a los metales; ya carbonizadas eran más fáciles de manipular y con una tijera especial para cortar metal se redujo el tamaño a tres medidas diferentes (0,5, 1,0 y 1,5 cm). El proceso de lixiviación se realizó mediante tres relaciones de agua regia (3:1, 1:1 y 1:3 de HCl y HNO<sub>3</sub> respectivamente), para iniciarlo se tomaron quince gramos de tarjeta de cada tamaño y se colocaron en beakers diferentes, a cada beacker se le adicionó veinticinco ml de agua regia; los beakers se colocaron en la plancha de agitación e inició el proceso de lixiviación a temperatura y agitación controlada, el proceso se detuvo cuando la solución llegó a sequedad y esto dependía de la relación de agua regia con la que se trabajaba. Finalizada la lixiviación se neutralizó el material lixiviado con una solución de hidróxido de sodio a 1N, se controló que el pH estuviera neutro y finalmente se filtró la solución, quedando en el beaker la solución con la que se trabajó la electrodeposición; en el papel filtro quedó el residuo de las tarjetas lixiviadas. Por medio de análisis de fluorescencia de rayos X se determinó el porcentaje masa de los metales de interés; las tarjetas lixiviadas se secaron en

un horno por cuarenta y cinco minutos a ochenta grados centígrados, después de este tiempo; las tarjetas secas se pulverizaron con la ayuda de un mortero y pistilo obteniendo un polvo fino que se introdujo al espectrofotómetro de fluorescencia de rayos X y se analizó el porcentaje masa de los metales de interés. Para la recuperación de cobre se elaboró una celda electrolítica (con una batería de 9V, una llave, alambre de cobre y cables de paso de corriente) y se utilizó la solución lixiviada y neutralizada (tenía la función del electrolito), la electrodeposición inició conectando el alambre de cobre al polo positivo de la batería y la llave al polo negativo y finalizó después de una hora de contacto.

Esto se realizó con el fin de conocer la relación de agua regia y el tamaño de partícula con mayor eficiencia, obteniendo como resultado que para la cuantificación de metales por el método de lixiviación con agua regia y caracterización con espectrofotómetro de fluorescencia de rayos X; la relación 3:1 y tamaño 0,5cm da mayor rendimiento en cuanto a porcentaje de masa y concentración de elementos. En el análisis la recuperación de cobre por electrodeposición se obtuvieron mejores resultados en la relación de agua regia 1:3 y tamaño 0,5 cm.

Con los resultados obtenidos se determinó que no existe diferencia significativa en las propiedades de las tarjetas de circuito eléctrico, es decir; la recuperación de metales (Fe, Ni, Cu, Ag, Sn, Au y Pb) en las tres relaciones de agua regia (3:1, 1:1 y 1:3) y los tres tamaños de tarjetas (0,5cm, 1,0cm y 1,5cm) no cambia significativamente y no hay variación significativa en la obtención de cobre bajo las relaciones de agua regia y tamaños de partícula mencionados anteriormente.



# OBJETIVOS

## General

Realizar una evaluación a nivel laboratorio de extracción de metales de tarjetas de dispositivos móviles descartados mediante la técnica de lixiviación ácida e identificación mediante fluorescencia de rayos X y la recuperación de cobre por electrodeposición.

## Específicos

1. Evaluar mediante técnicas de lixiviación ácida la recuperación de metales en tarjetas de dispositivos electrónicos.
2. Determinar el porcentaje de recuperación de metales mediante la utilización de un agente lixivante a diferentes concentraciones.
3. Establecer mediante Fluorescencia de Rayos X los metales obtenidos posterior a las técnicas de lixiviación ácida.
4. Evaluar la técnica de electrodeposición para la recuperación de cobre en el procedimiento de lixiviación ácida.
5. Determinar el tamaño óptimo de la muestra donde se obtuvo mayor porcentaje de recuperación en el proceso.



## HIPÓTESIS

Es posible la evaluación a nivel laboratorio de la extracción de metales, la recuperación de cobre y otros metales presentes en tarjetas de dispositivos móviles descartados, en función de diferentes relaciones de agua regia y diferentes tamaños de partícula.

### Hipótesis nula

H<sub>0,1</sub>: No existe una variación significativa en la recuperación de Fe en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

H<sub>0,2</sub>: No existe una variación significativa en la recuperación de Ni en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

H<sub>0,3</sub>: No existe una variación significativa en la recuperación de Cu en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

H<sub>0,4</sub>: No existe una variación significativa en la recuperación de Ag en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

H<sub>0,5</sub>: No existe una variación significativa en la recuperación de Sn en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

H<sub>0,6</sub>: No existe una variación significativa en la recuperación de Au en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

H<sub>0,7</sub>: No existe una variación significativa en la recuperación de Pb en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

H<sub>0,8</sub>: No existe una variación significativa en la obtención de cobre en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

### **Hipótesis alternativa**

H<sub>1,1</sub>: Existe una variación significativa en la recuperación de Fe en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

H<sub>1,2</sub>: Existe una variación significativa en la recuperación de Ni en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

H<sub>1,3</sub>: Existe una variación significativa en la recuperación de Cu en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

H<sub>1,4</sub>: Existe una variación significativa en la recuperación de Ag en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

H<sub>1,5</sub>: Existe una variación significativa en la recuperación de Sn en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

H<sub>1,6</sub>: Existe una variación significativa en la recuperación de Au en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

H<sub>1,7</sub>: Existe una variación significativa en la recuperación de Pb en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

H<sub>1,8</sub>: Existe una variación significativa en la obtención de cobre en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

## INTRODUCCIÓN

La ciencia y la tecnología evolucionan a gran velocidad implementando continuas mejoras en productos como la tecnología electrónica y dispositivos eléctricos (en general, todos los productos para el hogar o la oficina que tengan un cable). “Su desarrollo ha traído consigo el incremento en el número de aparatos tecnológicos y como consecuencia la generación de casi 50 millones de toneladas de residuos anuales.”<sup>1</sup>

Según los datos estadísticos publicados por la Superintendencia de Telecomunicaciones (SIT), se estima que, antes de que finalice 2020, los teléfonos móviles se incrementaron cerca de 21 por ciento, al pasar de 1,42 millones al cierre del segundo semestre del 2019 a más de 1,85 millones.

A nivel mundial se calcula que existen 5 000 millones de servicios de telefonía móvil con un crecimiento de 1 000 millones de celulares por año. “La tendencia en aumento continúa en los países en vías de desarrollo con un crecimiento del 20 % anual y sin señales de disminuir.”<sup>2</sup>

Entre un 65 % y un 80 % de las partes de un teléfono móvil pueden ser re- aprovechadas, de esta manera se extiende el ciclo de vida de los productos, se ahorran recursos y no se extraen más metales, además algunos de ellos contiene altos niveles de ciertos materiales; como plomo, cromo o cadmio, que los convierten en residuos peligrosos cuando son descartados.

---

<sup>1</sup> NOTICIAS ONU, *Los desechos electrónicos, una oportunidad de oro para el trabajo decente*. <https://news.un.org/es/story/2019/04/1455621>

<sup>2</sup> GREENPEACE. *El lado tóxico de la basura*.

“ En Guatemala el tiempo de vida útil de un teléfono celular se estima que son 3 años,”<sup>3</sup> aunque estos son reemplazados en menos de un año, no por daños al teléfono, sino por el avance de la tecnología.

En este trabajo se presenta una metodología a escala laboratorio, para cuantificar la cantidad de metales de interés que se encuentran presentes en las tarjetas de circuitos impresos de teléfonos celulares, para ello se han utilizado celulares que han sido descartados por llegar al final de su vida útil.

---

<sup>3</sup> PRENSA LIBRE, *Celulares*. <https://www.prensalibre.com/guatemala/comunitario/van-779-mil-celulares-robados/>

# 1. ANTECEDENTES

La ciencia y la tecnología evolucionan a gran velocidad implementando continuas mejoras en productos como la tecnología electrónica y dispositivos eléctricos. Su desarrollo ha traído consigo el incremento en el número de aparatos tecnológicos y la consiguiente generación de casi 50 millones de toneladas de residuos anuales. El alto contenido de estos residuos en metales tóxicos muy contaminantes y de metales preciosos de alto valor ha motivado el desarrollo de tratamientos para descontaminarlos y convertirlos en recursos secundarios de donde extraer metales como el oro, cuya concentración alcanza entre 10-10,000 gramos por tonelada frente a los 0,5-13,5 gramos por tonelada de las fuentes clásicas.<sup>4</sup>

De los 50 millones de toneladas que se generan cada año en el mundo, únicamente se recicla entre un 15 % y un 20 %. Buena parte de los desechos electrónicos restantes acaban en países en desarrollo en los que, a menudo, su reciclado corre a cargo del sector informal, que “se sirve de métodos rudimentarios que conllevan riesgos importantes para el medio ambiente y para la salud de la población local.”<sup>5</sup>

En 2013, en el Instituto Politécnico Nacional, del Distrito Federal, México, Hitchel Cuevas Galeana, realizó el trabajo de graduación con el título de “Reciclaje y afinación del oro a partir de chatarra electrónica”. El objetivo del trabajo de investigación fue realizar un método alternativo a los métodos que emplean cianuro o mercurio, la metodología trabajada fue, recuperación de oro por medio de la reacción con  $\text{HNO}_3$  a tarjetas de impresión, como método de

---

<sup>4</sup> TELEFÓNICA GUATEMALA. *Recuperación de oro en residuos electrónicos mediante bacterias cianógenas*. [http:// biotecnologia.fundaciontelefonica.com/2017/02/07/recuperacion-de-oro-en-residuos-electronicos-mediante-bacterias-cianogenicas/](http://biotecnologia.fundaciontelefonica.com/2017/02/07/recuperacion-de-oro-en-residuos-electronicos-mediante-bacterias-cianogenicas/)

<sup>5</sup> OMPI, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL. *Los desechos electrónicos y la innovación: aprovechar su valor oculto*. [https://www.wipo.int/wipo\\_magazine/es/2014/03/article\\_0001.html](https://www.wipo.int/wipo_magazine/es/2014/03/article_0001.html)

afinación se utilizó el método de Encuarte y el oro recuperado fue sometido a la técnica de absorción atómica.

En el 2012, en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, Ecuador, de la Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, Ricardo Andrés Montero Bermúdez, realizó el trabajo de graduación con el título “Diseño del proceso de recuperación de metales de procesadores y tarjetas de circuitos impresos de computadoras descartadas mediante lixiviación en columna”. El objetivo del trabajo fue recuperar oro, plata, cobre y niobio de procesadores y tarjetas de circuito impreso de computadoras descartadas, realizando técnicas de cianuración agitada y cianuración en columna con pretratamientos de reducción de tamaño y lixivitaciones de ácido sulfúrico, amoniaco, hidróxido de sodio y sulfato de amonio.

En el 2012, en Huajuapán de León, Oaxaca, México, el profesor Investigador Guillermo López Juárez, del Instituto de Minería de la Universidad Tecnológica de la Mixteca, realizó el trabajo de investigación denominado “Recuperación por vía hidrometalúrgica de oro, cobre y zinc contenidos en los circuitos impresos”. En el cual propone un proceso hidrometalúrgico para recuperar Au contenido en los circuitos impresos, específicamente se ha usado un sistema  $O_2-H_2SO_4^{2-}$ , mediante lixiviación dinámica ácida, evaluando experimentalmente los efectos de temperatura, concentración de  $H_2SO_4^{2-}$  y  $PO_2$  mientras que las soluciones ricas en cobre y cinc, producto de la lixiviación, quedan listas para ser recuperadas y un sustrato polimérico limpio de metales, que potencialmente puede ser también reciclado.

En el 2011, en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, Honorio Oliveros Gómez, realizó el trabajo de graduación llamado “Metodología para recuperar metales preciosos: oro, plata y grupo del platino,



presentes en desechos electrónicos”. En dicho trabajo se desarrolló a nivel de laboratorio una metodología de extracción de los metales preciosos oro, plata y del grupo del platino (platino, paladio, iridio y rodio) presentes en desechos electrónicos. La metodología desarrollada se determinó por la selección y desensamblaje, la caracterización de las fracciones metálicas, la reducción de tamaño y clasificación del material, la separación magnética y electrostática y la lixiviación del material de tarjetas electrónicas de desecho. El trabajo de investigación logró además recuperar mediante lixivaciones básicas y ácidas controladas a nivel de laboratorio, recuperaciones de valiosos por encima del 95 %.

En el 2010, en la Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria de la Escuela Politécnica Nacional de Quito, Ecuador, Vicente Sebastián Espinoza Echeverría, realizó un trabajo de graduación denominado “Recuperación de metales de las tarjetas de circuito eléctrico de celulares descartados”. En el cual se planteó el objetivo recuperar metales preciosos de las tarjetas de circuito impreso de los celulares acabada su vida útil. En dicho trabajo se realizaron diversas metodologías; tales como cianuración y lixivaciones con hidróxido de potasio (KOH), ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y cloruro de sodio (NaCl), con el fin de determinar el contenido de los metales en cada tarjeta.



## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Los desechos electrónicos

De acuerdo a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) un desecho electrónico es todo dispositivo alimentado por la energía eléctrica cuya vida útil haya culminado. El Convenio de Basilea por su parte, define la chatarra electrónica como todo equipo o componente electrónico incapaz de cumplir la tarea para la que originariamente fueron inventados y producidos. Al ser descartados pasan a ser residuos electrónicos.<sup>6</sup>

Los residuos electrónicos de los equipos informáticos generan una serie de problemas específicos, entre ellos que son tóxicos. Los componentes tóxicos más comunes son el plomo, el mercurio, y el cadmio. También llevan selenio y arsénico. Al ser fundidos liberan toxinas al aire, tierra y agua.

En el mundo se generan aproximadamente 50 millones de toneladas de basura electrónica, de esta cantidad únicamente se recicla entre un 15 % y un 20 %. Buena parte de los desechos electrónicos restantes acaban en países en desarrollo en los que, a menudo, su reciclado corre a cargo del sector informal, que se sirve de métodos rudimentarios que conllevan riesgos importantes para el medio ambiente y para la salud de la población local.

Los desechos electrónicos contienen una mezcla compleja de materiales peligrosos y muy tóxicos y metales nobles con valor económico. Es posible encontrar hasta 60 elementos de la tabla periódica en los aparatos electrónicos complejos, se necesitan tecnologías sofisticadas para su tratamiento, a fin de

---

<sup>6</sup> CAMPOS LÓPEZ, C. A. *Basura Electrónica*.  
<<http://desechoselectronicos2011.blogspot.com/2011/03/definicion-de-basura-electronica.html>>

lograr recuperar la mayor cantidad posible de esos recursos valiosos, reduciendo al máximo los efectos sociales o ambientales negativos.

Los desechos electrónicos contienen, entre otros contaminantes, metales pesados como cadmio, plomo y níquel, además de mercurio y plásticos bromados. Durante su vida útil, estos componentes son inofensivos, ya que están contenidos en placas, circuitos, conectores o cables que al ser desechados reaccionan con el contacto del agua y la materia orgánica, liberando compuestos tóxicos al suelo y a las fuentes de aguas subterráneas. “Debido a su carácter no biodegradable, estos desechos atentan contra el ambiente y la salud de los seres vivos. Aunque las cantidades usadas en cada dispositivo son pequeñas (por ejemplo, se utilizan 250 mg de plata en un teléfono móvil)”<sup>7</sup>, tiene impacto en el manto freático así como en la corteza aprovechable del suelo.

### **2.1.1. Tarjetas de circuitos impresos**

“Son placas de sustrato no conductor que se emplean para el montaje e interconexión de componentes electrónicos a través de rutas o pistas de un material conductor grabadas sobre el sustrato.”<sup>8</sup>

La mayoría de los circuitos impresos están compuestos por una a dieciséis capas conductoras, separadas y soportadas por capas de material aislante (sustrato) laminadas (pegadas) entre sí. Normalmente, la cantidad de capas de una PCB depende de la cantidad de señales que se quieren rutar.

---

<sup>7</sup> MINISTERIO DE AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES. *Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos*. <http://www.marn.gob.gt/Multimedios/1995.pdf>

<sup>8</sup> SAN MIGUEL, Pablo Alcalde. *Electrónica*. p. 190

Las capas pueden conectarse a través de orificios, llamados vías. Los orificios pueden ser electro recubiertos; para conectar cada capa del circuito, el fabricante mediante un proceso químico, deposita en todas las superficies expuestas del panel, incluyendo las paredes del agujero una fina capa de cobre químico, esto crea una base metálica de cobre puro; o también se pueden utilizar pequeños remaches. Los circuitos impresos de alta densidad pueden tener “vías ciegas”, que son visibles en solo un lado de la tarjeta, o “vías enterradas”, que no son visibles en el exterior de la tarjeta.

#### **2.1.1.1. Contaminantes presentes**

- Mercurio: Provoca daño cerebral.
- Berilio: Causa cáncer pulmonar.
- Cromo: Provoca trastornos genéticos.
- Cobalto: Genera trastornos y mutaciones genéticas.
- Bario: Ataca el sistema gastrointestinal.
- Plomo: Daña el sistema nervioso central.
- Arsénico: Incluso en pequeñas dosis es letal para el ser humano.
- Selenio: Ataca el sistema nervioso central, es mortal.
- Cadmio: Causa diarrea, fracturas, trastornos genéticos y cáncer.

#### **2.1.1.2. Porcentaje aproximado de metales presentes**

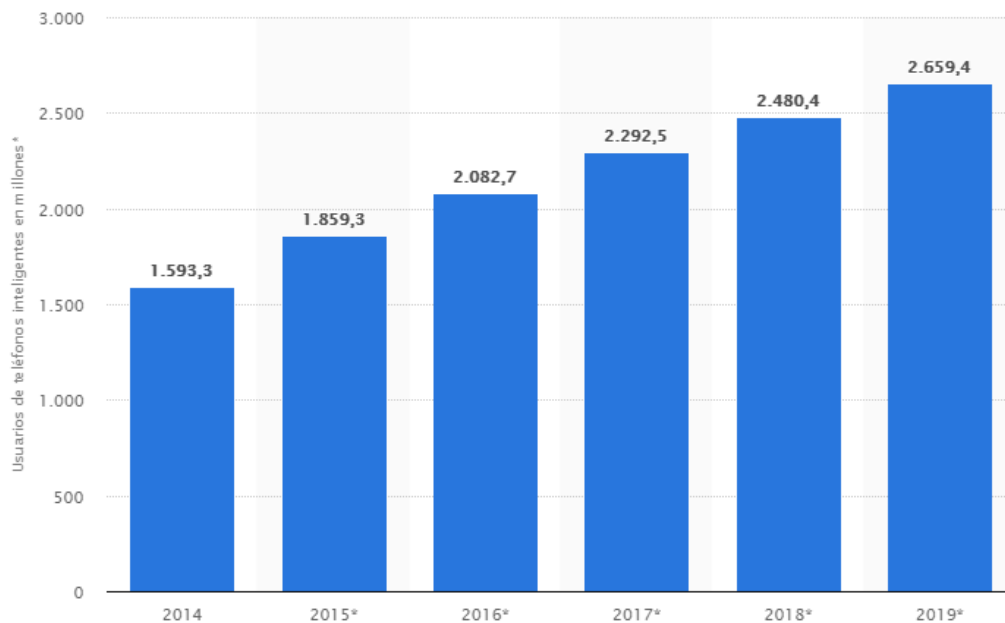
- Metales Básicos
- Cobre del 20 % al 50 %
- Níquel del 2 % al 5 %
- Estaño del 4 % al 5 %
- Plomo aproximadamente 2 %

- Aluminio del 2 % al 5 %
- Zinc del 1 % al 3 %
- Hierro 1 %

### 2.1.1.3. Metales preciosos

- Oro aproximadamente el 0,1 %
- Plata de aproximadamente el 0,2 %
- Paladio aproximadamente el 0,005 %

Figura 1. **Número de teléfonos inteligentes a nivel mundial desde 2014 hasta 2019**



Fuente: Statista. Número de usuarios de teléfonos inteligentes a nivel mundial desde 2014 hasta 2019. [www.es.statista.com/estadisticas/636569/usuarios-de-telefonos-inteligentes-a-nivel-mundial--2019/](http://www.es.statista.com/estadisticas/636569/usuarios-de-telefonos-inteligentes-a-nivel-mundial--2019/). Consulta: enero de 2020.

## 2.2. Telefonía celular

Los celulares contienen metales pesados y sustancias químicas tóxicas persistentes que contaminan el medio ambiente y afectan a la salud, en especial a los recuperadores informales que los manipulan sin la protección adecuada; además, muchos de sus componentes poseen materiales que son muy valiosos y podrían recuperarse en vez de disponerse en rellenos sanitarios o en basurales a cielo abierto. “Uno de los elementos con mayor potencial de contaminación son las baterías recargables.”<sup>9</sup>

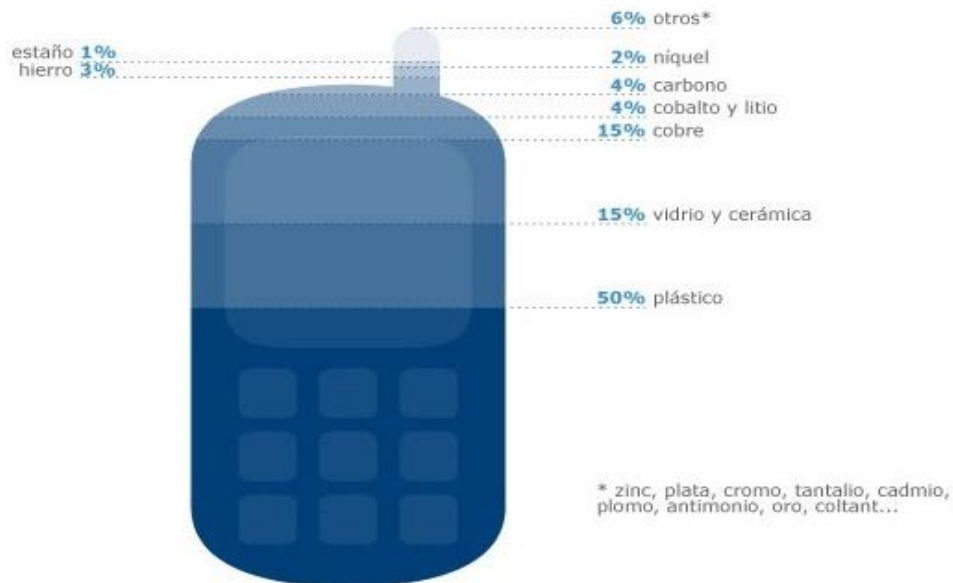
Un estudio sobre los beneficios de la minería urbana en los teléfonos móviles, “señala que un millón de estos aparatos puede producir 24 kilos de oro, 250 kilos de plata, 9 kilos de paladio y alrededor de nueve toneladas de cobre. Condiciones similares se presentan para la minería urbana de computadoras y monitores.”<sup>10</sup>

---

<sup>9</sup> GREENPEACE. *El lado tóxico de la basura*. p. 1.

<sup>10</sup> EL PAÍS. *Basura electrónica*. <http://www.elpais.com.uy/economia-y-mercado/basura-electronica-crecera-mundo.html>

Figura 2. **Composición de un teléfono celular**



Fuente: i.Ambiente...¿Cuál es el impacto ambiental de los Smartphone en el medio ambiente?.  
[www.i-ambiente.es/?q=noticias/cual-es-el-impacto-de-los-smartphones-en-el-medioambiente](http://www.i-ambiente.es/?q=noticias/cual-es-el-impacto-de-los-smartphones-en-el-medioambiente).

Consulta: febrero de 2020.

### 2.2.1. **Tarjeta de circuitos de un teléfono celular**

En un teléfono celular, la tarjeta de circuitos impresos corresponde a un 40 % del peso total del teléfono, sin considerar el peso de la batería.

La tarjeta de circuito impreso de un teléfono celular, está constituido de 58 % plástico, el 17 %, vidrio y el 25 %, metales como hierro, cobre, plata e



incluso oro. “Las baterías son los elementos más contaminantes porque contienen elementos como el cadmio, el litio e hidruros metálicos.”<sup>11</sup>

Figura 3. Tarjeta de circuito impreso de un teléfono celular



Fuente: Circuit. Tarjeta de circuitos eléctricos. [www.circuit---0.blogspot.com/2018/12/60-circuit-board-for-iphone-6-plus.html](http://www.circuit---0.blogspot.com/2018/12/60-circuit-board-for-iphone-6-plus.html). Consultado: enero de 2020

### 2.2.2. Telefonía móvil en Guatemala

Según el boletín estadístico publicado por la Superintendencia de Telecomunicaciones (SIT), “en el primer semestre del año 2019 los teléfonos móviles con plan postpago se incrementaron cerca de 16 por ciento, al pasar de 1,34 millones al cierre de 2018 a más de 1,55 millones lo cual significa que hay más celulares que guatemaltecos.”<sup>12</sup>

<sup>11</sup> BORJA, G. S. *Componentes reciclables en un teléfono móvil*. <http://plantandoideascrecensoluciones.blogspot.com/2012/04/definicion-el-telefono-moviles-un.html>

<sup>12</sup> EL PERÍODICO. *Operadoras reportan 2.8 millones de líneas móviles*. [<https://elperiodico.com.gt/inversion/2019/10/03/operadoras-reportan-20-8-millones-de-lineas-moviles/>](https://elperiodico.com.gt/inversion/2019/10/03/operadoras-reportan-20-8-millones-de-lineas-moviles/)

De acuerdo con la información, había 20 millones 841 mil usuarios de teléfonos móviles en Guatemala, de los cuales el 92,5 por ciento (19,2 millones) cuenta con un prepago como forma de contratación del servicio y solo el 7,46 por ciento tiene un plan contratado postpago (1,5 millones).

Al cierre de 2018, el 93,4 por ciento de 20,4 millones de líneas correspondían a prepago, es decir que los operadores reportaron 1,3 millones de usuarios en el método prepago (tarjeta o recarga) y el 6,56 por ciento al modelo de crédito o postpago, unos 19,1 millones.

En el método de cobro con facturación mensual la empresa Comunicaciones Celulares, S.A. (Tigo) reportó 667 mil 988 usuarios es decir el 43 por ciento del mercado, mientras que Telefónica Móviles y Telecomunicaciones de Guatemala (Claro) cuentan con 155 mil 688 y 731 mil 917 clientes, en total las dos tendrían el 57 por ciento de participación en este mercado.<sup>13</sup>

En nuestro país, la empresa de telefonía móvil Tigo en el año 2012 lanzó la campaña “Reciclando con Tigo”, esta iniciativa aún está vigente y aunque en Guatemala no tenemos el hábito de la minería urbana, el primer año de la iniciativa se recolectó el 10 % del total de celulares vendidos en el país (información obtenida vía telefónica, Tigo Guatemala). El tratamiento que se le da al teléfono es confidencial.

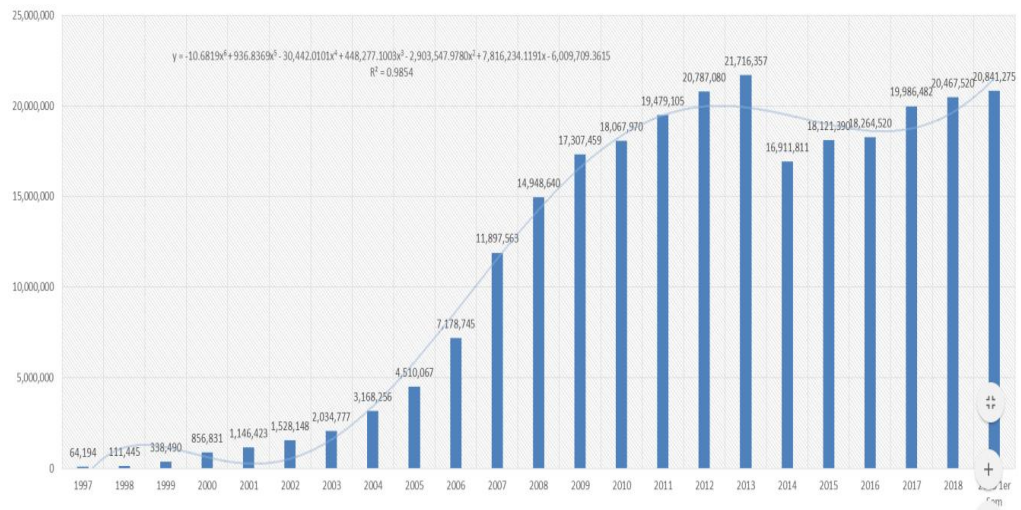
El 8 de mayo de 2012, la empresa de telefonía móvil Telefónica hizo alianza con Reciclaworld (RCW) y presentaron la campaña “Telefónica y Reciclaworld, reciclaje de celulares, proyecto de reciclaje de celulares en desuso para clientes de esta telefonía y personas interesadas en apoyar esta actividad. “El tratamiento de los teléfonos, es realizado en otro país, con el

---

<sup>13</sup> EL PERÍODICO. *Operadoras reportan 2.8 millones de líneas móviles.*  
<<https://elperiodico.com.gt/inversion/2019/10/03/operadoras-reportan-20-8-millones-de-lineas-moviles/>>

equipo adecuado y cuidando el medio ambiente, con lo obtenido de los teléfonos celulares se fabrican nuevos productos.”<sup>14</sup>

Figura 4. **Crecimiento de la telefonía móvil en Guatemala 1997-2019**

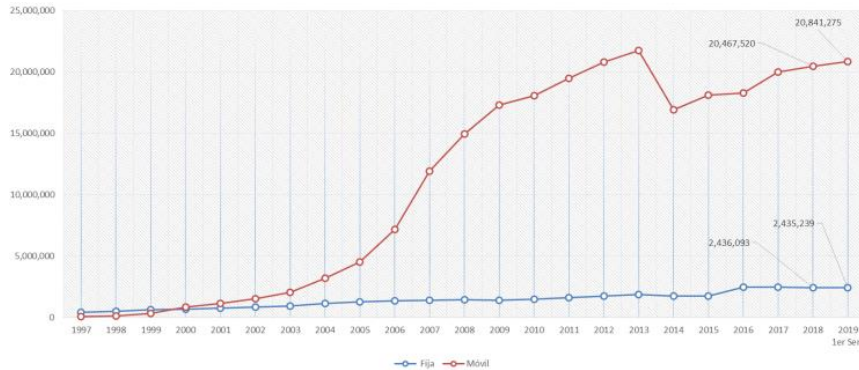


Fuente: Superintendencia de Comunicaciones. Boletín Estadístico, primer semestre 2019.

p. 2

<sup>14</sup> TELEFÓNICA GUATEMALA *Recuperación de oro en residuos electrónicos mediante bacterias cianógenas*. [http:// biotecnologia.fundaciontelefonica.com/2017/02/07/recuperacion-de-oro-en-residuos-electronicos-mediante-bacterias-cianogenicas/](http://biotecnologia.fundaciontelefonica.com/2017/02/07/recuperacion-de-oro-en-residuos-electronicos-mediante-bacterias-cianogenicas/)

Figura 5. **Crecimiento de la telefonía móvil y fija en Guatemala 1997-2019**



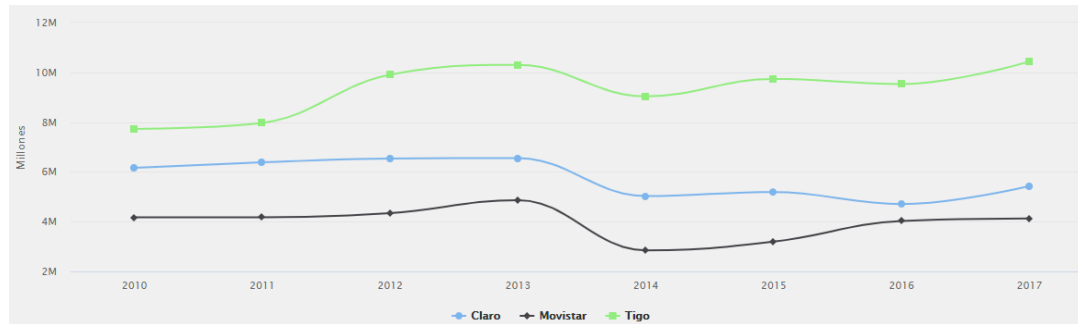
Fuente: Superintendencia de Comunicaciones. Boletín Estadístico, primer semestre 2019. p. 29.

### 2.2.2.1. Distribución en el mercado guatemalteco

Las estadísticas de la SIT detallan que, hasta el primer semestre del 2018, había 18 millones 732 mil usuarios en la modalidad prepago, el 94 % del total del mercado. De ese porcentaje, el 53,16 %, con 10 millones 655 mil, eran de Comunicaciones Celulares (Tigo); el 27,89 % con cinco millones 590 mil de Telecomunicaciones de Guatemala (Claro) y el 18,95 % con tres millones 797 mil pertenecían a Telefónica<sup>15</sup>.

<sup>15</sup> GUATEVISIÓN. *Venta de operaciones de Telefónica de Guatemala*. <https://www.guatevision.com/noticias/nacional/economia-que-pasara-tras-la-venta-de-operaciones-de-telefonica-guatemala>

Figura 6. **Total de líneas móviles por operador**



Fuente: TS. *Panorama de mercado- Guatemala-*. <https://www.telesemana.com/panorama-de-mercado/guatemala/>.

### 2.3. **Iniciativas de reciclaje de minería urbana**

Hoy en día existen varias instituciones que se dedican al reciclaje de electrodomésticos y ha beneficiado por la disminución de contaminación ambiental.

#### 2.3.1. **La Iniciativa Step**

Es una iniciativa global de colaboración que lidera de forma única el pensamiento, el conocimiento, la sensibilización y la innovación mundiales en la gestión y el desarrollo de la recuperación, la reutilización y la prevención de los desechos electrónicos ambientalmente, económicamente y éticamente. La misión de Step es:

- Fomentar el diálogo, la cooperación y el consenso de los miembros orientados a las soluciones, proporcionando una plataforma mundial para compartir información, conocimientos y recomendaciones basados en la

investigación científica de expertos y en la experiencia sectorial de múltiples actores.

- Trabajar internacionalmente con asociados externos receptivos para elaborar políticas justas y objetivas para estimular, demostrar respuestas prácticas, medidas y eficaces a la prevención, gestión y procesos de los desechos electrónicos. Al hacerlo, se prestará especial atención a las áreas de diseño, reparación y renovación de productos, sistemas de gestión mejorados y creación de capacidad de reciclaje.
- “Dirigir el debate sobre la gestión de los desechos electrónicos en todo el mundo proporcionando una base científica para informar y cambiar activamente la conciencia, los conocimientos, las actitudes y el comportamiento del público internacional de empresas y consumidores.”<sup>16</sup>

#### **2.4. Basura electrónica en Guatemala**

“En Centroamérica en el año 2019, el país de mayor producción de basura electrónica fue Panamá, con un promedio de 8,2 kilogramos producidos por cada habitante. Guatemala ocupó el cuarto lugar con un promedio de 3,5 kilogramos por habitante,”<sup>17</sup> sin embargo, destaca como el único de la región que cuenta con legislación para el manejo de los desechos electrónicos, como sucede en México, Ecuador, Colombia, Perú y Argentina. En el país existen entidades como E-Waste, dedicadas a impulsar programas de divulgación y educación, así como a implementar campañas de acopio y selección de

---

<sup>16</sup> UNITED NATIONS UNIVERSITY. *Solving the E-waste Problem (StEP)*.  
<https://unu.edu/projects/solving-the-e-waste-problem-step-initiative.html#outline>

<sup>17</sup> LA REPÚBLICA. *País produce alta cantidad de basura electrónica*.  
[https://www.larepublica.net/noticia/pais\\_produce\\_alta\\_cantidad\\_de\\_basura\\_electronica](https://www.larepublica.net/noticia/pais_produce_alta_cantidad_de_basura_electronica)

desperdicios electrónicos en empresas, comunidades y centros educativos. Los desechos son enviados a países industrializados, donde se extraen materiales como bronce, aluminio, cobre y vidrio.

Estados Unidos y China son los principales productores de basura electrónica del mundo; entre ambos se genera el 32 % kilogramos de basura por persona del total mundial.

En Guatemala, esta cultura de minería urbana aún no ha tomado auge, sin embargo, es necesario iniciar a tomar conciencia de lo importante que es la minería urbana y recordemos que el cambio inicia en cada uno de nosotros.

En Guatemala existen diversas instituciones que se dedican a la recolección de basura electrónica, la mayoría de ellas las envían a diversos países para su adecuado tratamiento; entre las que podemos mencionar tenemos:

#### **2.4.1. E-Waste Guatemala**

Es la asociación de mayor peso que se tiene en el país. Está dedicada a la preservación del medio ambiente a través del manejo de desechos electrónicos, uno de sus objetivos principales es llevar a cabo programas de divulgación y educación, así como la implementación de campañas de acopio y selección de desperdicios electrónicos.

Del total de desechos a nivel mundial un 5 % corresponde a los desechos electrónicos o eléctricos, E-Waste de Guatemala trabaja en dar una solución integral a este tema.

#### 2.4.1.1. Forma de trabajo

“E-Waste Guatemala efectúan cada año una campaña de recolección de equipos inservibles, que no desarmen ni manipulan, sino que los envía a países industrializados donde les extraen materiales como el bronce, aluminio, cobre y vidrio, que pueden ser empleados otra vez en la fabricación de nuevos equipos y componentes.”<sup>18</sup>

E-Waste está asociado con una organización no gubernamental (ONG), y la Junta Directiva de la asociación no autoriza dar información del proceso a personas ajenas a la institución. Guatemala ni en Centroamérica cuenta con el equipo necesario para la extracción de los minerales, de tal manera el material reciclado es enviado a países como Alemania, China y Estados Unidos (información obtenida vía telefónica por E-Waste, 2017).

Trabaja por medio de visitas personalizadas, en las cuales se implementan programas de divulgación, así como campañas de acopio y selección de desechos electrónicos con un estricto manejo de los mismos, informando a las personas de su alto grado de contaminación y toxicidad. Cada una de las personas o instituciones que colaboran con el programa de divulgación y educación, así como con las campañas de acopio y selección de desechos electrónicos, se constituye en un protector activo del medio ambiente en nuestro país y en el mundo.

Como parte de las acciones que E-Waste de Guatemala realiza permanentemente se encuentran los proyectos y programas de investigación,

---

<sup>18</sup> E-WASTE DE GUATEMALA. *Desechos electrónicos*.  
<<http://www.ewastedeguatemala.org/index.php>> [Consulta: agosto de 2017].



asesoría, consultoría y desarrollo de temas de impacto ambiental y de interés a la comunidad y al país.

#### **2.4.2. Departamento de Atención Ambiental, Municipalidad de Guatemala, MUNICENTRO**

Esta recicladora está a cargo de la Municipalidad de Guatemala, su función principal es fomentar la cultura de reciclaje en los ciudadanos.

El proyecto de reciclar basura electrónica nació en noviembre de 2015. “El material reciclado es enviado a la empresa e-Waste Guatemala, la cual se encarga de separar los materiales para luego ser enviados a otros países, principalmente en Alemania.”<sup>19</sup>

#### **2.4.3. Recelca**

Es una empresa guatemalteca que ofrece una amplia gama de servicios de reciclaje electrónico. “Todos los residuos se procesan bajo una estricta supervisión. Recicla equipos electrónicos, eléctricos y sus componentes, separando todos los materiales peligrosos.”<sup>20</sup>

### **2.5. Generalidades de los metales a recuperar**

A continuación se presentan algunas de las cualidades de los metales más importantes cuantificados.

---

<sup>19</sup> MUNICIPALIDAD DE GUATEMALA. *Centro de atención ambiental*. <http://www.muniguate.info/post/151979048096/dos-centros-m%C3%A1s-de-acopio-de-desechos>

<sup>20</sup> RECELCA. Reciclajes Electrónicos Centroamericanos, S.A. <<http://www.recelca.com/?PAGE=3&PANELID=3>>

### 2.5.1. Oro

Los metales de transición, también llamados elementos de transición es el grupo al que pertenece el oro. En este grupo de elementos químicos al que pertenece el oro, se encuentran aquellos situados en la parte central de la tabla periódica, concretamente en el bloque d. Entre las características que tiene el oro, así como las del resto de metales de transición se encuentra la de incluir en su configuración electrónica el orbital d, parcialmente lleno de electrones. Propiedades de este tipo de metales, entre los que se encuentra el oro son su elevada dureza, el tener puntos de ebullición, fusión elevados, ser buenos conductores de la electricidad y el calor.

El estado del oro en su forma natural es sólido. El oro es un elemento químico de aspecto amarillo metálico y pertenece al grupo de los metales de transición. El número atómico del oro es 79. El símbolo químico del oro es Au. “El punto de fusión del oro es de 1 337,33 grados Kelvin o de 1 065,18 grados Celsius o grados centígrados. El punto de ebullición del oro es de 3 129 grados Kelvin o de 2 856,85 grados Celsius o grados centígrados.”<sup>21</sup>

Tabla I. **Características principales del oro**

Símbolo químico	Au
Número atómico	79
Grupo	11
Periodo	6
Aspecto	Amarillo metálico
Densidad	19 300 kg/m <sup>3</sup>
Masa atómica	196,966569 u
Radio medio	135 pm

<sup>21</sup> ELEMENTOS. *Elementos 2020*. <http://elementos.org.es/oro>

Continuación tabla I

Radio atómico	174
Radio covalente	144 pm
Radio de van der Waals	166 pm
Configuración electrónica	[Xe]4f145d106s1
Electrones por capa	2, 8, 18, 32, 18, 1
Estados de oxidations	3, 1 (anfótero)
Estructura cristalina	cúbica centrada en las caras
Estado	<u>sólido</u>
Punto de fusión	1 337,33 K
Punto de ebullición	3 129 K
Calor de fusión	12,55 kJ/mol
Presión de vapor	0,000237 Pa a 1 337 K
Electronegatividad	2,54
Calor específico	128 J/(K·kg)
Conductividad eléctrica	45,5 × 106S/m
Conductividad térmica	317 W/(K·m)

Fuente: ELEMENTOS DE LA TABLA PERIÓDICA Y SUS PROPIEDADES. Oro.

<https://elementos.org.es/oro>. Consultado: marzo 2017

### 2.5.2. Hierro

Los metales de transición, también llamados elementos de transición es el grupo al que pertenece el hierro. En este grupo de elementos químicos al que pertenece el hierro, se encuentran aquellos situados en la parte central de la tabla periódica, concretamente en el bloque d. Entre las características que tiene el hierro, así como las del resto de metales de transición se encuentra la de incluir en su configuración electrónica el orbital d, parcialmente lleno de electrones. Propiedades de este tipo de metales, entre los que se encuentra el hierro son su elevada dureza, el tener puntos de ebullición y fusión elevados y ser buenos conductores de la electricidad y el calor.

El estado del hierro en su forma natural es sólido (ferromagnético). “El punto de fusión del hierro es de 1 808 grados Kelvin o de 1 535,85 grados Celsius o grados centígrados. El punto de ebullición del hierro es de 3 023 grados Kelvin o de 2 750,85 grados Celsius o grados centígrados.”<sup>22</sup>

Tabla II. **Características principales del hierro**

<b>Símbolo químico</b>	Fe
<b>Número atómico</b>	26
<b>Grupo</b>	8
<b>Periodo</b>	4
<b>Bloque</b>	d
<b>Densidad</b>	7 874 kg/m <sup>3</sup>
<b>Masa atómica</b>	55,845 u
<b>Radio medio</b>	140 pm
<b>Radio atómico</b>	156
<b>Radio covalente</b>	126 pm
<b>Configuración electrónica</b>	[Ar]3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup>
<b>Electrones por capa</b>	2, 8, 14, 2
<b>Estados de oxidación</b>	2, 3
<b>Óxido</b>	Anfótero
<b>Estructura cristalina</b>	cúbica centrada en el cuerpo
<b>Estado</b>	sólido
<b>Punto de fusión</b>	1 808 K
<b>Punto de ebullición</b>	3 023 K
<b>Calor de fusión</b>	13,8 kJ/mol
<b>Presión de vapor</b>	7,05 Pa a 1 808 K
<b>Electronegatividad</b>	1,83
<b>Calor específico</b>	440 J/(K·kg)
<b>Conductividad eléctrica</b>	9,93·10 <sup>6</sup> S/m
<b>Conductividad térmica</b>	80,2 W/(K·m)

Fuente: ELEMENTOS DE LA TABLA PERIÓDICA Y SUS PROPIEDADES. *Hierro*

<https://elementos.org.es/hierro>. Consultado: marzo 2017

### 2.5.3. Plomo

El plomo pertenece al grupo de elementos metálicos conocido como metales del bloque p que están situados junto a los metaloides o semimetales en la tabla periódica. Este tipo de elementos tienden a ser blandos y presentan puntos de fusión bajos, propiedades que también se pueden atribuir al plomo, dado que forma parte de este grupo de elementos.

El estado del plomo en su forma natural es sólido. El plomo es un elemento químico de aspecto gris azulado y pertenece al grupo de los metales del bloque p. El número atómico del plomo es 82. El símbolo químico del plomo es Pb. “El punto de fusión del plomo es de 600,61 grados Kelvin o de 328,46 grados Celsius o grados centígrados. El punto de ebullición del plomo es de 2 022 grados Kelvin o de 1 749,85 grados Celsius o grados centígrados.”<sup>23</sup>

Tabla III. **Características principales del plomo**

<b>Símbolo químico</b>	Pb
<b>Número atómico</b>	82
<b>Grupo</b>	14
<b>Periodo</b>	6
<b>Aspecto</b>	gris azulado
<b>Bloque</b>	p
<b>Densidad</b>	11340 kg/m <sup>3</sup>
<b>Masa atómica</b>	207,2 u
<b>Radio medio</b>	180 pm
<b>Radio atómico</b>	154
<b>Radio covalente</b>	147 pm
<b>Radio de van der Waals</b>	202 pm
<b>Configuración electrónica</b>	[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>2</sup>
<b>Estados de oxidación</b>	4, 2 (anfótero)
<b>Estructura cristalina</b>	cúbica centrada en las caras

<sup>23</sup>

ELEMENTOS. *Elementos 2020*. <http://elementos.org.es/plomo>

Continuación tabla III.

<b>Estado</b>	sólido
<b>Punto de fusión</b>	600,61 K
<b>Punto de ebullición</b>	2 022 K
<b>Calor de fusión</b>	4,799 kJ/mol
<b>Presión de vapor</b>	4,21 × 10 <sup>-7</sup> Pa a 600 K
<b>Electronegatividad</b>	2,33 (Pauling)
<b>Calor específico</b>	129 J/(kg·K)
<b>Conductividad eléctrica</b>	4,81 × 10 <sup>6</sup> m <sup>-1</sup> ·Ω <sup>-1</sup>
<b>Conductividad térmica</b>	35,3 W/(m·K)

Fuente: ELEMENTOS DE LA TABLA PERIÓDICA Y SUS PROPIEDADES. *Plomo*.  
<https://elementos.org.es/plomo>. Consultado: marzo 2017

#### 2.5.4. Estaño

El estaño pertenece al grupo de elementos metálicos conocido como metales del bloque p que están situados junto a los metaloides o semimetales en la tabla periódica. “Este tipo de elementos tienden a ser blandos y presentan puntos de fusión bajos, propiedades que también se pueden atribuir al estaño, dado que forma parte de este grupo de elementos.”<sup>24</sup>

Tabla IV. **Características principales del estaño**

<b>Símbolo químico</b>	Sn
<b>Número atómico</b>	50
<b>Grupo</b>	14
<b>Periodo</b>	5
<b>Aspecto</b>	gris plateado brillante
<b>Bloque</b>	p
<b>Densidad</b>	7 310 kg/m <sup>3</sup>
<b>Masa atómica</b>	118,710 u

<sup>24</sup>

ELEMENTOS. *Elementos 2020*. <http://elementos.org.es/estaño>

Continuación tabla LV.

<b>Radio covalente</b>	180 pm
<b>Radio de van der Waals</b>	217 pm
<b>Configuración electrónica</b>	[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup>
<b>Electrones por capa</b>	2, 8, 18, 18, 4
<b>Estados de oxidación</b>	4,2
<b>Óxido</b>	anfótero)
<b>Estructura cristalina</b>	Tetragonal
<b>Estado</b>	sólido
<b>Punto de fusión</b>	505,08 K
<b>Punto de ebullición</b>	2 875 K
<b>Calor de fusión</b>	7,029 kJ/mol
<b>Presión de vapor</b>	5,78·10 <sup>-21</sup> Pa a 505 K
<b>Electronegatividad</b>	1,96
<b>Calor específico</b>	228 J/(K·kg)
<b>Conductividad eléctrica</b>	9,17·10 <sup>6</sup> S/m
<b>Conductividad térmica</b>	66,6 W/(K·m)

Fuente: ELEMENTOS DE LA TABLA PERIÓDICA Y SUS PROPIEDADES. *Estaño*.  
<https://elementos.org.es/estaño>. Consultado: marzo 2017

### 2.5.5. Plata

Los metales de transición, también llamados elementos de transición es el grupo al que pertenece la plata. En este grupo de elementos químicos al que pertenece la plata, se encuentran aquellos situados en la parte central de la tabla periódica, concretamente en el bloque d. Entre las características que tiene la plata, así como las del resto de metales de transición se encuentra la de incluir en su configuración electrónica el orbital d, parcialmente lleno de electrones. “Propiedades de este tipo de metales, entre los que se encuentra la plata son su elevada dureza, el tener puntos de ebullición y fusión elevados y ser buenos conductores de la electricidad y el calor.”<sup>25</sup>.

<sup>25</sup> ELEMENTOS. *Elementos 2020*. <http://elementos.org.es/plata>

Tabla V. **Características principales de la plata**

<b>Símbolo químico</b>	Ag
<b>Número atómico</b>	47
<b>Aspecto</b>	Plateado
<b>Densidad</b>	10 490 kg/m <sup>3</sup>
<b>Masa atómica</b>	107,8683 u
<b>Radio covalente</b>	153 pm
<b>Configuración electrónica</b>	[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup>
<b>Estados de oxidación</b>	1
<b>Óxido</b>	Anfótero
<b>Estructura cristalina</b>	cúbica centrada en las caras
<b>Estado</b>	<u>sólido</u>
<b>Punto de fusión</b>	1 234,93 K
<b>Punto de ebullición</b>	2 435 K
<b>Calor de fusión</b>	11,3 kJ/mol
<b>Presión de vapor</b>	0,34 Pa a 1 234 K
<b>Electronegatividad</b>	1,93
<b>Calor específico</b>	232 J/(K·kg)
<b>Conductividad térmica</b>	429 W/(K·m)

Fuente: ELEMENTOS DE LA TABLA PERIÓDICA Y SUS PROPIEDADES. *Plata*.

<https://elementos.org.es/plata>. Consultado: marzo 2017

### 2.5.6. **Níquel**

Los metales de transición, también llamados elementos de transición es el grupo al que pertenece el níquel. En este grupo de elementos químicos al que pertenece el níquel, se encuentran aquellos situados en la parte central de la tabla periódica, concretamente en el bloque d. Entre las características que tiene el níquel, así como las del resto de metales de transición se encuentra la de incluir en su configuración electrónica el orbital d, parcialmente lleno de electrones. “Propiedades de este tipo de metales, entre los que se encuentra el



níquel son su elevada dureza, el tener puntos de ebullición y fusión elevados y ser buenos conductores de la electricidad y el calor.”<sup>26</sup>

Tabla VI. **Características principales del níquel**

<b>Símbolo químico</b>	Ni
<b>Número atómico</b>	28
<b>Densidad</b>	8,908 kg/m <sup>3</sup>
<b>Masa atómica</b>	58,71 u
<b>Radio covalente</b>	121 pm
<b>Radio de van der Waals</b>	163 pm
<b>Configuración electrónica</b>	[Ar]3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup>
<b>Estados de oxidación</b>	+3, +2, 0
<b>Óxido</b>	levemente básico
<b>Estructura cristalina</b>	cúbica centrada en las caras
<b>Estado</b>	sólido
<b>Punto de fusión</b>	1 728 K
<b>Punto de ebullición</b>	2 730 K
<b>Calor de fusión</b>	17,47 kJ/mol
<b>Presión de vapor</b>	237 Pa a 1 726 K
<b>Electronegatividad</b>	1,91
<b>Calor específico</b>	440 J/(K·kg)
<b>Conductividad eléctrica</b>	14,3 × 10 <sup>6</sup> S/m
<b>Conductividad térmica</b>	90,7 W/(K·m)

Fuente: ELEMENTOS DE LA TABLA PERIÓDICA Y SUS PROPIEDADES. *Níquel*.

<https://elementos.org.es/niquel>. Consultado: 17 marzo 2017

### 2.5.7. Cobre

Los metales de transición, también llamados elementos de transición es el grupo al que pertenece el cobre. En este grupo de elementos químicos al que pertenece el cobre, se encuentran aquellos situados en la parte central de la tabla periódica, concretamente en el bloque d. Entre las características que

<sup>26</sup> ELEMENTOS. *Elementos 2020*. <http://elementos.org.es/niquel>

tiene el cobre, así como las del resto de metales de transición se encuentra la de incluir en su configuración electrónica el orbital d, parcialmente lleno de electrones. “Propiedades de este tipo de metales, entre los que se encuentra el cobre son su elevada dureza, el tener puntos de ebullición y fusión elevados y ser buenos conductores de la electricidad y el calor.”<sup>27</sup>

Tabla VII. **Características principales del cobre**

<b>Símbolo químico</b>	Cu
<b>Número atómico</b>	29
<b>Periodo</b>	4
<b>Densidad</b>	8 960 kg/m <sup>3</sup>
<b>Masa atómica</b>	63,536 u
<b>Radio covalente</b>	138 [3]pm
<b>Radio de van der Waals</b>	140 [3]pm
<b>Configuración electrónica</b>	[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup>
<b>Estados de oxidación</b>	+1, +2
<b>Óxido</b>	levemente básico
<b>Estructura cristalina</b>	cúbica centrada en las caras
<b>Estado</b>	sólido
<b>Punto de fusión</b>	1 357,77 K
<b>Punto de ebullición</b>	3 200 K
<b>Calor de fusión</b>	13,1 kJ/mol
<b>Electronegatividad</b>	1,9
<b>Calor específico</b>	385 J/(K·kg)
<b>Conductividad eléctrica</b>	58,108 × 10 <sup>6</sup> S/m
<b>Conductividad térmica</b>	400 W/(K·m)

Fuente: ELEMENTOS DE LA TABLA PERIÓDICA Y SUS PROPIEDADES. *Cobre*.

<https://elementos.org.es/cobre>. Consultado: 17 marzo 2017

## 2.6. Técnicas de recuperación de metales de interés de tarjetas de circuitos impresos

El proceso de minería urbana de las tarjetas de circuito impreso está orientado a recuperar los metales y sobre todo los metales preciosos que contiene, para obtener finalmente concentrados metálicos que pueden ser empleados como materia prima, también se recupera el cobre, aluminio, plomo, zinc, entre otros.

En términos generales la minería urbana se desarrolla en tres etapas: recolección, pretratamiento y tratamiento final, donde la eficiencia del proceso es igual al producto de la eficacia en cada etapa.

Figura 7. **Secuencia de las principales etapas de la minería urbana**



Fuente: Reck K.B. y Graedel. *Challenges in Metal Recycling*. p. 690.

Las eficiencias en la recolección están relacionadas con factores sociales y gubernamentales, pero las eficiencias en separación y clasificación están relacionadas con las tecnologías de la minería urbana. “Por razones económicas y de escala, sólo se aplican las tecnologías más básicas, lo cual hace que la eficiencia global sea baja.”<sup>28</sup>

<sup>28</sup> RECK K. B. y Graedel. *Challenges in Metal Recycling*.

Para las etapas de pre-procesamiento y obtención final del producto se han propuesto distintos métodos:

- Procesos mecánicos
- Piro metalúrgico
- Hidrometalúrgicos
- Electroquímico
- Combinaciones

El proceso más común actualmente es el método hidrometalúrgico. Este trabajo se va a enfocar mayormente en este método.

### **2.6.1. Procesos hidrometalúrgicos**

Consiste en una lixiviación ácida o cáustica de la tarjeta de circuito impreso finalmente molida para disolver los metales. Posteriormente, “estas soluciones se someten a procesos de separación, tales como extracción con disolvente, precipitación, intercambio iónico, concentración o electrólisis para recuperar selectivamente los metales disueltos.”<sup>29</sup>

Se emplean disoluciones muy concentradas de ácido nítrico y ácido clorhídrico, lo que dificulta la escala industrial debido a su elevada corrosividad y a la importante generación de contaminantes. Tiene como limitante el número de metales que se puede recuperar y el grado de pureza obtenido al final del proceso. “Este tipo de procesos se utilizan normalmente en países en desarrollo

---

<sup>29</sup> CALDERÓN, J. Trejo. *Metales preciosos en residuos electrónicos para su refinación en Ecuador.*

y se enfocan en la recuperación de metales preciosos y algunos metales base como, cobre, estaño entre otros.”<sup>30</sup>

Dentro de los procesos hidrometalúrgicos hay dos alternativas de recuperación de oro, plata y cobre de residuos electrónicos:

- Lixiviación con cianuro
- Lixiviaciones ácidas y básicas

### **2.6.2. Lixiviación**

Es un proceso en el que un disolvente líquido se pone en contacto con un sólido pulverizado produciéndose la disolución de uno de los componentes del sólido. Existen dos tipos de lixiviación; ácida y básica.

Métodos con base al material lixivante más usados y sus características:

#### **2.6.2.1. Ácido sulfúrico**

- Altos rendimientos de azufre
- Recuperación de metales preciosos desde residuos
- Se puede aplicar electro obtención
- Fácil recuperación de metales asociados

#### **2.6.2.2. Cloruro de sodio**

- Posibilidad de recuperar metales preciosos
- Electro obtención muy compleja

---

<sup>30</sup> CUI J. Zhang, L. *Metallurgical recovery of metals from electronic waste.*

- Alta corrosión

### **2.6.2.3. Ácido Nítrico**

- Baja recuperación de metales preciosos
- Materiales convencionales de construcción

### **2.6.2.4. Amonio**

- Azufre se convierte en sulfato
- Dificultad de recuperar metales preciosos
- Materiales convencionales de construcción

## **2.7. Determinación cuantitativa de metales por Fluorescencia de Rayos X**

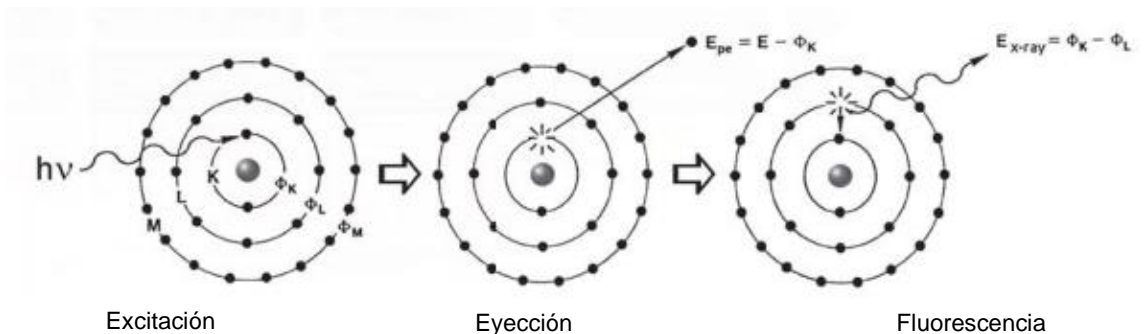
La técnica de fluorescencia de rayos X (XRF) se utiliza para determinar concentraciones de elementos químicos en diversos tipos de muestras. Los electrones se encuentran en el átomo distribuidos en los distintos niveles y subniveles de energía, ocupando primero aquéllos de menor energía hasta colocarse todos; a este estado de mínima energía del átomo se le denomina estado fundamental.

En la fluorescencia de rayos X, un electrón puede ser expulsado de su orbital atómico por la absorción de luz (fotones) desde un tubo de rayos X. La energía del fotón ( $h\nu$ ) debe ser mayor que la energía con la que está unido el electrón al núcleo de ese átomo. Cuando un electrón orbital interior es expulsado de un átomo, un electrón de un nivel de energía más alto se transfiere para llenar la vacante orbital. Durante esta transición, un fotón puede

ser emitido. La energía (E) de los rayos X emitidos convencionalmente es expresada en kiloelectronvolts (keV).

El espectro de líneas características consiste en una serie de líneas espectrales características del elemento emisor que se originan cuando existe la transición del electrón. Para una línea de emisión fluorescente, en un elemento dado, el número de fotones por unidad de tiempo (conteo por segundo o cps) está relacionado con la cantidad de dicho elemento en una muestra. La velocidad de conteo se calcula midiendo, durante un tiempo determinado, el número de fotones detectados por las diferentes líneas elementales de fluorescencia de rayos X (picos espectrales) observadas. Así, el análisis elemental cualitativo y cuantitativo se alcanza mediante la determinación de energía de los picos de rayos X en una muestra de espectro y midiendo sus velocidades de conteo asociadas.

Figura 8. **Secuencia de producción de rayos X**



Fuente: RIGAKU. Manual de Espectrofotómetro de fluorescencia de rayos X -Analizador elemental de EDXRF a bajo costo-. p. 4.

El proceso de producción de este espectro característico puede esquematizarse del modo siguiente:

- Excitación: el choque de un electrón o fotón X incidente con un electrón de las capas internas del átomo, produce la expulsión de dicho electrón quedando el átomo en estado de excitado.
- Emisión: este átomo en estado excitado tiende a volver inmediatamente a su estado fundamental, para lo cual se producen saltos de electrones de niveles más externos para cubrir el hueco producido. “En este proceso hay un desprendimiento de energía, igual a la diferencia de energía de los niveles entre los que se produce el salto electrónico, en forma de radiación electromagnética correspondiente a la región de rayos X.”<sup>31</sup>

### **2.7.1. Descripción de los Espectros Fluorescentes**

La radiación fluorescente emitida por la muestra viaja hacia el detector; en el caso de que sea un semi conductor los fotones fluorescentes que llegan a él, causan ionizaciones y cada una de ellas es convertida a señal de voltaje con amplitud proporcional a la energía incidente.

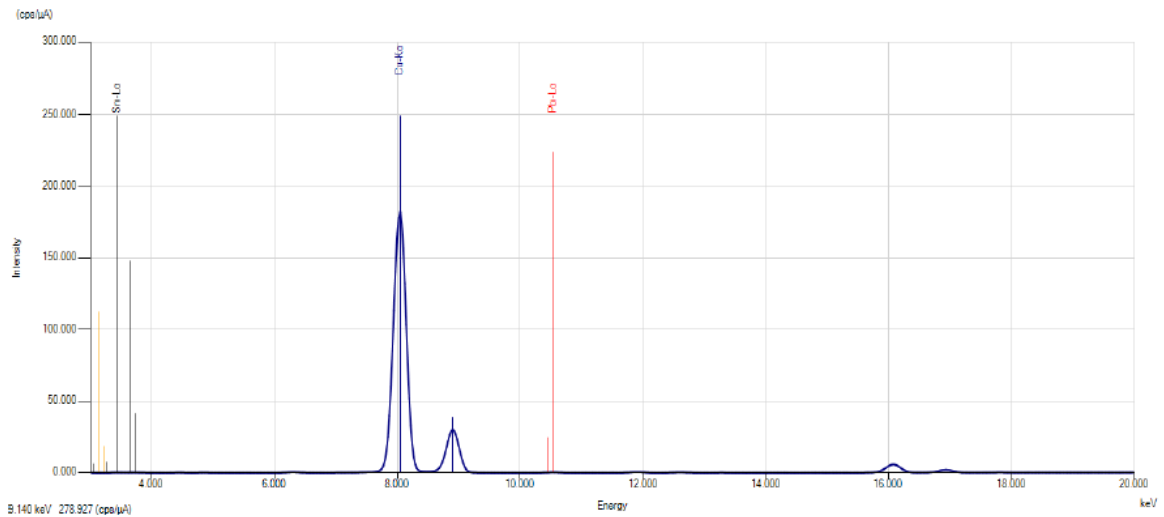
Se obtiene de esta manera un espectro como el que se muestra en la Figura 9 correspondiente a un análisis de piezas de tarjetas de teléfono. Se observan picos correspondientes a las líneas de emisión características (Fe, Ni, Cu, Ag, Sn, Au, Pb); el área bajo los picos representa el número de fotones fluorescentes que llegan al detector.

---

<sup>31</sup> UNEP. *Fluorescencia de Rayos X*.  
[http://www.usc.es/export9/sites/webinstitucional/gl/investigacion/riaidt/raiosx/descargas/UNED\\_Curso\\_Fluorescencia.pdf](http://www.usc.es/export9/sites/webinstitucional/gl/investigacion/riaidt/raiosx/descargas/UNED_Curso_Fluorescencia.pdf)



Figura 9. **Espectro correspondiente a análisis de piezas de tarjetas por fluorescencia de rayos X.**



Fuente: Imagen tomada por espectrofotómetro de Fluorescencia de rayos X de LAFIQ.

## 2.8. Métodos de separación química

Los métodos de separación química son procesos en los que los compuestos químicos se separan. Estos métodos se caracterizan por la necesidad de hacer un cambio químico previo a la separación, cambiando las sustancias originales.

Hay varios métodos de separación, pero los más importantes y conocidos son: electrólisis, gravimetría y termólisis.

### 2.8.1. Electrólisis

Las moléculas de algunos compuestos químicos cuando se hallan en disolución acuosa presentan la capacidad de separarse en sus componentes

iónicos más simples, los compuestos químicos que presentan esta propiedad se denominan electrólitos.

Entonces electrólisis se refiere a la disociación de un electrolito en sus iones constituyentes, se da una reacción oxido-reducción endotérmica que se realiza gracias a la energía suministrada por una corriente eléctrica. La reacción no es espontánea, necesita la ayuda de una corriente eléctrica, en este caso una batería de 9 Voltios, actuando como una bomba de electrones.

### **2.8.2. Electrodeposición**

Es el método de cubrir objetos con una película fina de otro metal. El principio que rige este fenómeno es la electrólisis, cuyo nombre procede de dos radicales, electro que hace referencia a electricidad y lisis que significa ruptura. La electrodeposición implica la reducción (disminución del estado de oxidación o ganancia de electrones) de un compuesto metálico disuelto en un electrólito y una deposición del metal resultante sobre una superficie conductora.

Si en la celda electrolítica se introducen dos electrodos unidos a una batería por medio de cables de conducción, se puede comprobar que:

- Los iones positivos son atraídos por el electrodo negativo, que está unido al polo negativo de la batería, y allí gana dos electrones, reduciendo los átomos del otro metal a neutros.
- Los iones negativos son atraídos por el electrodo positivo, que está unido al polo positivo de la batería, al que ceden un electrón, oxidándose a átomos neutros, que se unen en parejas.

La fuente de corriente eléctrica es la que proporciona la energía necesaria para lograr la reducción; cuando no existe una corriente eléctrica, los iones están distribuidos en la disolución completamente al azar y al aplicarla se produce la migración de esos iones hacia el cátodo.

#### **2.8.2.1. Celda electrolítica**

Es el dispositivo utilizado para la descomposición mediante corriente eléctrica de sustancias ionizadas denominadas electrólitos. La celda electrolítica en este trabajo será un beaker de 200 ml.

#### **2.8.2.2. Electrolito**

Es el medio acuoso que contiene los iones del metal a depositar y otros iones que migran permitiendo el paso de la corriente entre los electrodos.

#### **2.8.2.3. Ánodo**

Material sólido conductor en cuya superficie se realiza un proceso de oxidación con liberación de electrones. Puede ser activo o inerte, cuando es activo; generalmente es del mismo metal que se desea depositar, cuando es inerte; no sufre ningún cambio químico durante el proceso.

#### **2.8.2.4. Cátodo**

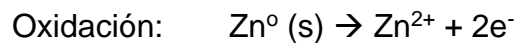
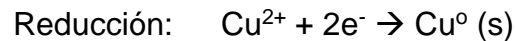
Electrodo sólido conductor en cuya superficie se realiza un proceso de reducción con los electrones provenientes del ánodo.

## 2.9. Cálculos en procesos electrolíticos

Las relaciones cuantitativas entre la carga eléctrica y las cantidades de sustancias que se obtienen en una electrólisis fueron enunciadas por Michael Faraday, conocidas como Las Leyes de Faraday.

### 2.9.1. Leyes de Faraday

Estas leyes pueden deducirse a partir de la estequiometría de las semireacciones que tienen lugar en cada electrodo.



Reacción general:



#### 2.9.1.1. Primera ley de Faraday

La masa que se deposita o libera en un electrodo es directamente proporcional a la carga eléctrica que atraviesa la solución:

$$w = \frac{Q}{I * t}$$

Donde:

w: Masa depositada o liberada

I: Intensidad, expresada en Amperios

Q: Carga eléctrica, expresada en Culombios

t: Tiempo, expresada en segundos

### 2.9.1.2. Segunda ley de Faraday

La cantidad de masa depositada de un elemento en un electrodo es proporcional a su peso equivalente

$$w = \frac{\text{Peso atómico}}{\text{No. de oxidación}}$$

### 2.9.1.3. Tercera ley de Faraday de la Electrólisis

La cantidad de electricidad que es necesaria para que se deposite 1 equivalente gramo de un elemento es  $F = 96\ 500$  culombios (constante de Faraday).

$$w = \frac{I * t * PM}{F * n}$$

Donde:

w: Peso del metal depositado, expresado en g

I: Intensidad de corriente aplicada, expresada en A

t: Tiempo en el cual se aplicó la corriente, expresado en s

PM: Peso molecular de la sustancia que se está depositando g/mol

n: Estado de valencia de la sustancia que se deposita, adimensional.

F: Constante de Faraday 96 500 (A.seg/peso equiv)

## 2.10. Potencial de reducción

Es la tendencia de un electrodo en una celda electrolítica a adquirir electrones. Se considera una medida efectiva de medir la energía química de oxidación-reducción mediante un electrodo, convirtiéndola en energía eléctrica, se expresa en mili voltios – mV – y nos informa sobre el potencial de oxidación o de reducción.

Los potenciales de celda elevados (más positivos) son indicativos de una mayor fuerza impulsora de la reacción tal como está escrita. Debe separarse el potencial total de la celda indicando la contribución individual de las dos semireacciones, lo cual permite determinar la tendencia relativa de que tenga lugar una semirreacción de oxidación o de reducción en particular. Los electrones fluyen desde el punto de mayor hacia el de menor potencial eléctrico.

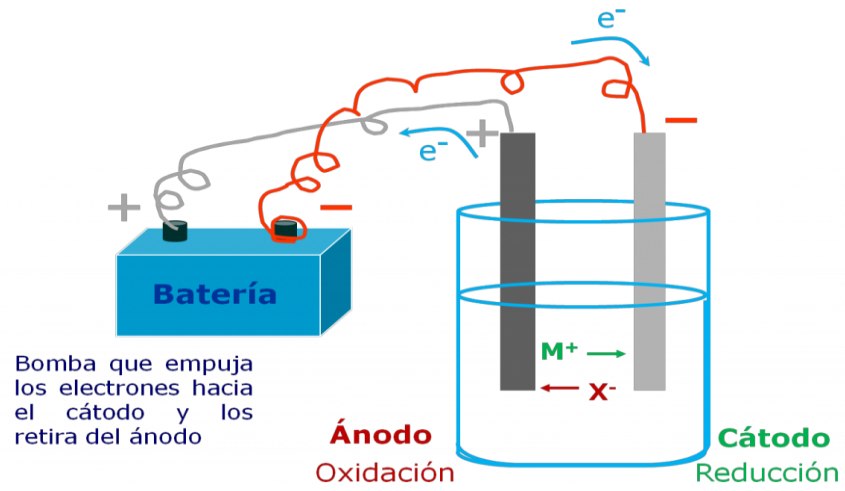
La aplicación más importante de los potenciales de electrodo es la predicción de la espontaneidad de las reacciones redox y se sabe si es espontánea si el valor del potencial de la celda es mayor a cero.

Tabla VIII. **Potenciales de reducción de metales y reacción general**

Electrodo	Semirreacción	E° (V)
Cu <sup>0</sup>	$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}^0 (\text{s})$	0,340
Zn <sup>0</sup>	$\text{Zn}^0 (\text{s}) \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,763
$\text{Zn}^0 (\text{s}) + \text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{Cu}^0 (\text{s})$		1,103

Fuente: elaboración propia

Figura 10. Representación de la celda para la electrodeposición



Fuente: elaboración propia





### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables del método

El problema se enfoca en el análisis de tres variables cuantitativas principales: relación agua regia, tamaño de partícula, peso de Cu depositado.

Tabla IX. Descripción de las variables del proceso

Variable	Unidad	Factor de diseño		Tipo de variable	
		Constante	Variable	Independiente	Dependiente
Peso de tarjeta	g		X	X	
Tamaño de tarjeta	cm		X		X
Relación de agua regia	adimensional	X			X
Volumen de ácido	ml	X			X
Tiempo de contacto con ácido	horas		X		X
Velocidad de agitación	Rpm	X			X
Temperatura de la plancha	°C	X			X
Temperatura del horno	°C	X		X	
Tiempo de secado en el horno	Min	X			X
Peso de la llave	G		X	X	
Peso del alambre de Cu	G		X	X	
Corriente eléctrica	A	X		X	

Fuente: elaboración propia

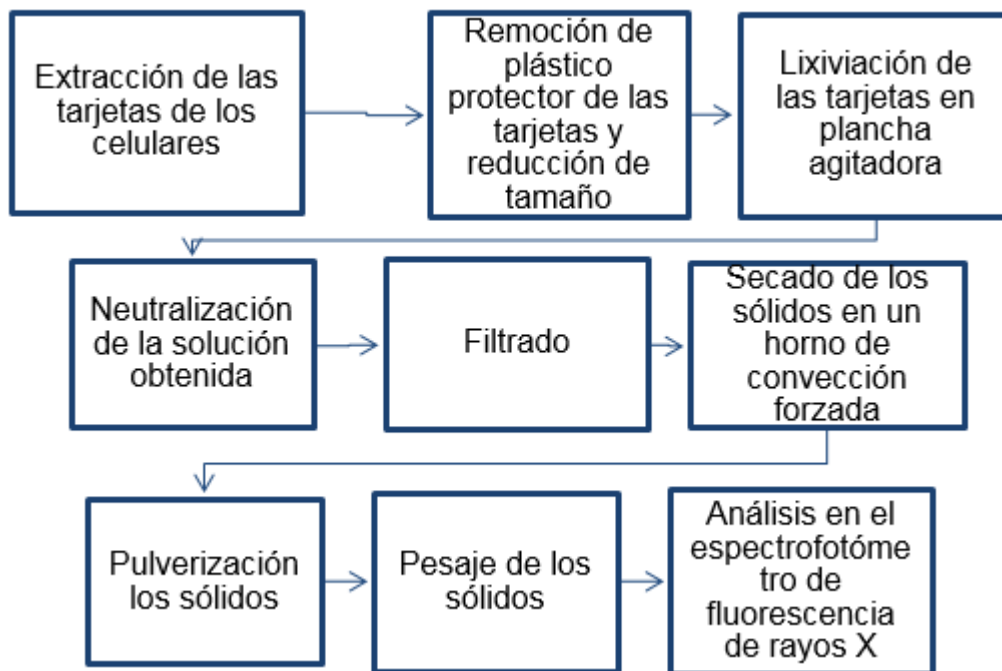
### 3.2. Delimitación del campo de estudio

Esta investigación está delimitada al área de Ingeniería Química, enfocada en la operación unitaria de extracción sólido-líquido y en área de química general; específicamente en el proceso de electrodeposición del cobre.

#### 3.2.1. Etapas de la investigación

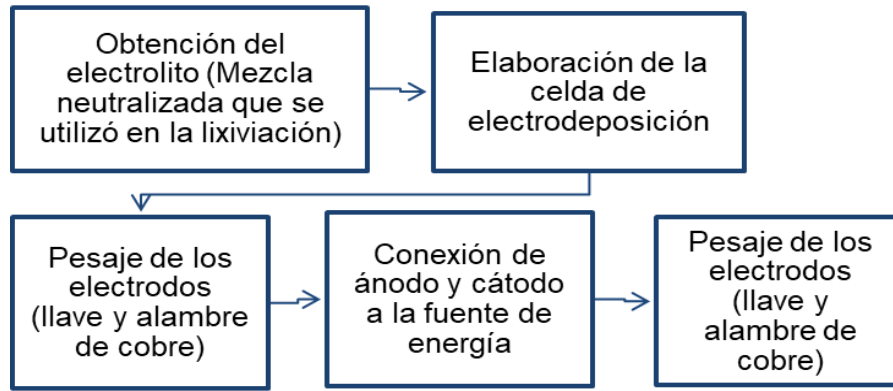
Evaluación de la extracción de metales y recuperación de cobre en tarjetas de dispositivos móviles descartados.

Figura 11. Diagrama de proceso de la extracción de metales



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Diagrama de proceso de obtención de cobre**



Fuente: elaboración propia.

### 3.2.2. **Ubicación del desarrollo de la investigación**

La remoción de plástico y la lixiviación se lleva a cabo en el laboratorio de Análisis fisicoquímicos –LAFIQ- de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala y la electrodeposición se realiza en las instalaciones de Centro Logístico, empresa de fertilizantes, Anillo Periférico, zona 11 de la ciudad de Guatemala.

### 3.3. **Recursos humanos disponibles**

- Investigador: Sindy Francelly Vásquez Bran
- Asesor: Ing. Qco. Víctor Manuel Monzón Valdez
- Co-asesora Lcda. Q., M.Sc. Ingrid Lorena Benítez Pacheco

### 3.4. **Recursos materiales disponibles**

Los recursos necesarios fueron:

#### **3.4.1. Materias primas**

- Tarjetas de celulares
- Llaves
- Alambre de cobre calibre 18, marca Hillman
- Batería 9V; marca GP, recargable 170mA

#### **3.4.2. Cristalería**

- Beacker 250 ml
- Embudo
- Balón aforado 1000 ml
- Vidrio de reloj

#### **3.4.3. Equipo**

- Horno mufla marca Thermolyne, modelo S-D1415-N
- Campana de extracción marca Asem
- Plancha de calentamiento con agitación marca Cimarec
- Horno de convección forzada, marca Premlab, modelo CHF5CSA
- Espectrofotómetro de fluorescencia de rayos X, marca Rigaku Modelo Net-ac.

#### **3.4.4. Insumos**

- Guantes térmicos
- Guantes de neopreno
- Lentes de protección
- Botas industriales

- Bata
- Set de herramientas para desarmar teléfonos celulares
- Papel filtro
- Tijera para cortar metal
- Tiras de papel pH
- Mortero y pistilo

#### **3.4.5. Reactivos**

- Ácido Clorhídrico (HCl) al 36 %
- Ácido Nítrico (HNO<sub>3</sub>) al 65 %
- Agua destilada

#### **3.4.6. Instrumentos de medición**

- Balanza analítica, marca Radwag, modelo WPS 750/C/1
- Cronómetro

### **3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa**

La técnica de este trabajo de investigación es cuantitativa, ya que se obtendrán datos de valores experimentales, con el fin de evaluar los resultados de recuperar metales y extraer cobre.

#### **3.5.1. Extracción de metales por método de lixiviación**

- Extraer tarjetas de circuitos impresos de los celulares con la ayuda de un kit de herramientas.

- Remover la cobertura plástica, resistencias y diodos de las tarjetas en la mufla.
- Reducir la tarjeta a tres diferentes tamaños (0,5 X 0,5, 1,0 X 1,0 y 1,5 X 1,5 cm), con tijera especial para cortar metal.
- Preparar agua regia a tres diferentes proporciones (3:1, 2:2 y 1:3 HCl y HNO<sub>3</sub> respectivamente).
- Agregar a un beaker quince gramos de tarjeta de un mismo tamaño y adicionar veinticinco ml de agua regia.
- Realizar la lixiviación en una plancha con agitación y con la ayuda de un imán, a 95°C y velocidad moderada. El tiempo de calentamiento y agitación dependerá de la concentración del agua regia.
- Neutralizar el ácido con una solución de hidróxido de sodio a 1N.
- Filtrar la solución.
- Secar el papel filtro dentro del horno por 45 minutos a 80°C.
- Pulverizar la parte sólida retenida en el papel filtro con un mortero y un pistilo.
- Analizar el sólido pulverizado en el espectrofotómetro de fluorescencia de rayos X.

### **3.5.2. Recuperación de cobre**

- Colocar la solución lixiviada y neutralizada en un beaker (será el electrolito).
- Elaborar una celda electrolítica (con el electrolito, batería de 9V, llave y alambre de cobre) para la electrodeposición.
- Pesar la llave y el alambre de cobre.
- Realizar la electrodeposición conectando el alambre de cobre al polo positivo de la batería y la llave al polo negativo de la batería, por una hora.

- Pesar la llave y el alambre de cobre.

### 3.6. Recolección y ordenamiento de la información

La materia prima se obtuvo de la extracción de las tarjetas que están dentro de los teléfonos celulares, los teléfonos celulares provinieron de alumnos del curso de Ecología de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. La extracción de metales y recuperación de cobre se realizó con tres diferentes relaciones de agua regia y tres diferentes tamaños de partícula; realizando para cada concentración y tamaño 3 corridas.

Tabla X. **Temperatura de horno mufla para carbonización de tarjeta**

Temperatura mufla (°C)	Peso inicial (g)	Tiempo en mufla (min)	Peso final (g)
800	10,50	15	1,25
700	14,22	15	1,29
600	12,45	20	3,51
550	13,97	25	4,23
500	12,17	30	4,89

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC

Tabla XI. **Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 3:1, tamaño de tarjeta 0,5cm, corrida 1**

Corrida		1				
Relación agua regia		3:1				
Tamaño Tarjeta (cm)		0,5				
Elemento	%masa	Intensidad elemento (cps/ $\mu$ A)	Intensidad Estándar (cps/ $\mu$ A)	Contante de Sensibilidad	Concentración Estándar (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
Fe	0	0	117,935	1	2	0
Ni	0	0	55,46	1	2	0
Cu	26,4	0,0757	52,426	1	2	2,89E-03
Ag	0,0374	0,0035	NC	NC	NC	NC
Sn	1,62	0,0175	NC	NC	NC	NC
Au	0,0481	0,002	NC	NC	NC	NC
Pb	0,0289	0,0012	83,643	1	2	2,87E-05

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XII. **Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 3:1, tamaño de tarjeta 0,5 cm, corrida 2**

Corrida		2				
Relación agua regia		3:1				
Tamaño Tarjeta (cm)		0,5				
Elemento	%masa	Intensidad elemento (cps/ $\mu$ A)	Intensidad Estándar (cps/ $\mu$ A)	Contante de Sensibilidad	Concentración Estándar (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
Fe	0	0	117,935	1	2	0,00



Continuación tabla XII

<b>Ni</b>	0,078	0,0155	55,46	1	2	5,59E-04
<b>Cu</b>	93,9	0,0115	52,426	1	2	4,39E-04
<b>Ag</b>	0,122	0,0029	NC	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	5,22	0,0612	NC	NC	NC	NC
<b>Au</b>	0	0	NC	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	0	0	83,643	1	2	0,00

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XIII. **Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 3:1, tamaño de tarjeta 0,5 cm, corrida 3**

<b>Corrida</b>		3				
<b>Relación agua regia</b>		3:1				
<b>Tamaño Tarjeta (cm)</b>		0,5				
<b>Elemento</b>	<b>%masa</b>	<b>Intensidad elemento (cps/μA)</b>	<b>Intensidad Estándar (cps/μA)</b>	<b>Contante de Sensibilidad</b>	<b>Concentración Estándar (mg/L)</b>	<b>Concentración del elemento (mg/L)</b>
<b>Fe</b>	0,309	0,034	117,935	1	2	5,77E-04
<b>Ni</b>	1,7	0,0447	55,46	1	2	1,61E-03
<b>Cu</b>	91,7	0,0113	52,426	1	2	4,31E-04
<b>Ag</b>	0,125	0,0022	NC	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	4,69	0,0595	NC	NC	NC	NC
<b>Au</b>	0,565	0,0616	NC	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	0,867	0,0072	83,643	1	2	1,72E-04

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XIV. **Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 3:1, tamaño de tarjeta 1,0 cm, corrida 1**

Corrida		1				
Relación agua regia		3:1				
Tamaño Tarjeta (cm)		1,0				
Elemento	%masa	Intensidad elemento (cps/ $\mu$ A)	Intensidad Estándar (cps/ $\mu$ A)	Contante de Sensibilidad	Concentración Estándar (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
Fe	0	0	117,935	1	2	0,00
Ni	0	0	55,46	1	2	0,00
Cu	14,7	0,00834	52,426	1	2	3,18E-04
Ag	0	0	NC	NC	NC	NC
Sn	0,281	0,087	NC	NC	NC	NC
Au	0,0178	0,0333	NC	NC	NC	NC
Pb	0	0	83,643	1	2	0,00

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XV. **Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 3:1, tamaño de tarjeta 1,0 cm, corrida 2**

Corrida		2				
Relación agua regia		3:1				
Tamaño Tarjeta (cm)		1,0				
Elemento	%masa	Intensidad elemento (cps/ $\mu$ A)	Intensidad Estándar (cps/ $\mu$ A)	Contante de Sensibilidad	Concentración Estándar (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)

Continuación tabla XV

<b>Fe</b>	0	0	117,935	1	2	0,00
<b>Ni</b>	0,53	0,0403	55,46	1	2	1,45E-03
<b>Cu</b>	94,1	0,0112	52,426	1	2	4,27E-04
<b>Ag</b>	0,115	0,0026	NC	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	4,67	0,0563	NC	NC	NC	NC
<b>Au</b>	0	0	NC	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	0,571	0,0648	83,643	1	2	1,55E-03

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XVI. **Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 3:1, tamaño de tarjeta 1,0 cm, corrida 3**

<b>Corrida</b>		3				
<b>Relación agua regia</b>		3:1				
<b>Tamaño Tarjeta (cm)</b>		1,0				
<b>Elemento</b>	<b>%masa</b>	<b>Intensidad elemento (cps/<math>\mu</math>A)</b>	<b>Intensidad Estándar (cps/<math>\mu</math>A)</b>	<b>Contante de Sensibilidad</b>	<b>Concentración Estándar (mg/L)</b>	<b>Concentración del elemento (mg/L)</b>
<b>Fe</b>	1,77	0,0338	117,935	1	2	5,73E-04
<b>Ni</b>	1,27	0,0407	55,46	1	2	1,47E-03
<b>Cu</b>	92,6	0,0113	52,426	1	2	4,31E-04
<b>Ag</b>	0,0817	0,0056	NC	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	3,73	0,0518	NC	NC	NC	NC
<b>Au</b>	0	0	NC	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	0,519	0,0063	83,643	1	2	1,51E-04

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XVII. **Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 3:1, tamaño de tarjeta 1,5cm, corrida 1**

Corrida		1				
Relación agua regia		3:1				
Tamaño Tarjeta (cm)		1,5				
Elemento	%masa	Intensidad elemento (cps/ $\mu$ A)	Intensidad Estándar (cps/ $\mu$ A)	Contante de Sensibilidad	Concentración Estándar (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
Fe	0	0	117,935	1	2	0,00
Ni	0	0	55,46	1	2	0,00
Cu	28,6	0,0078	52,426	1	2	2,98E-04
Ag	0,0903	0,0007	NC	NC	NC	NC
Sn	3,15	0,0429	NC	NC	NC	NC
Au	0	0	NC	NC	NC	NC
Pb	0,0283	0,0117	83,643	1	2	2,80E-04

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XVIII. **Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 3:1, tamaño de tarjeta 1,5 cm, corrida 2**

Corrida		2				
Relación agua regia		3:1				
Tamaño Tarjeta (cm)		1,5				
Elemento	%masa	Intensidad elemento (cps/ $\mu$ A)	Intensidad Estándar (cps/ $\mu$ A)	Contante de Sensibilidad	Concentración Estándar (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
Fe	0	0	117,935	1	2	0,00

Continuación tabla XVIII

<b>Ni</b>	0,966	0,0457	55,46	1	2	1,65E-03
<b>Cu</b>	94,5	0,0032	52,426	1	2	1,22E-04
<b>Ag</b>	0,0979	0,0056	NC	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	4,07	0,0532	NC	NC	NC	NC
<b>Au</b>	0	0	NC	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	0,406	0,0028	83,643	1	2	6,70E-05

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XIX. **Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 3:1, tamaño de tarjeta 1,5 cm, corrida 3**

<b>Corrida</b>		<b>3</b>				
<b>Relación agua regia</b>		<b>3:1</b>				
<b>Tamaño Tarjeta (cm)</b>		<b>1,5</b>				
<b>Elemento</b>	<b>%masa</b>	<b>Intensidad elemento (cps/<math>\mu</math>A)</b>	<b>Intensidad Estándar (cps/<math>\mu</math>A)</b>	<b>Contante de Sensibilidad</b>	<b>Concentración Estándar (mg/L)</b>	<b>Concentración del elemento (mg/L)</b>
<b>Fe</b>	0	0	117,935	1	2	0,00
<b>Ni</b>	0,355	0,0125	55,46	1	2	4,51E-04
<b>Cu</b>	62,3	0,003	52,426	1	2	1,14E-04
<b>Ag</b>	0,00952	0,0032	NC	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	3,54	0,0542	NC	NC	NC	NC
<b>Au</b>	0,0125	0,00025	NC	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	0	0	83,643	1	2	0,00

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XX. **Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 2:2, tamaño de tarjeta 0,5 cm, corrida 1**

<b>Corrida</b>		1				
<b>Relación agua regia</b>		2:2				
<b>Tamaño Tarjeta (cm)</b>		0,5				
<b>Elemento</b>	<b>%masa</b>	<b>Intensidad elemento (cps/μA)</b>	<b>Intensidad Estándar (cps/μA)</b>	<b>Contante de Sensibilidad</b>	<b>Concentración Estándar (mg/L)</b>	<b>Concentración del elemento (mg/L)</b>
<b>Fe</b>	0	0	117,935	1	2	0,00
<b>Ni</b>	0,113	0,0203	55,46	1	2	7,32E-04
<b>Cu</b>	48,1	0,053	52,426	1	2	2,02E-03
<b>Ag</b>	0	0	NC	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	1,26	0,0217	NC	NC	NC	NC
<b>Au</b>	0	0	NC	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	0,0721	0,002	83,643	1	2	4,78E-05

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XXI. **Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 2:2, tamaño de tarjeta 0,5cm, corrida 2**

<b>Corrida</b>		2				
<b>Relación agua regia</b>		2:2				
<b>Tamaño Tarjeta (cm)</b>		0,5				
<b>Elemento</b>	<b>%masa</b>	<b>Intensidad elemento (cps/μA)</b>	<b>Intensidad Estándar (cps/μA)</b>	<b>Contante de Sensibilidad</b>	<b>Concentración Estándar (mg/L)</b>	<b>Concentración del elemento (mg/L)</b>
<b>Fe</b>	0	0	117,935	1	2	0,00

Continuación tabla XXI

<b>Ni</b>	0,853	0,0407	55,46	1	2	1,47E-03
<b>Cu</b>	95	0,0118	52,426	1	2	4,50E-04
<b>Ag</b>	0,102	0,0012	NC	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	4,06	0,0517	NC	NC	NC	NC
<b>Au</b>	0	0	NC	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	0	0	83,643	1	2	0,00

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

**Tabla XXII. Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 2:2, tamaño de tarjeta 0,5 cm, corrida 3**

<b>Corrida</b>		<b>3</b>				
<b>Relación agua regia</b>		<b>2:2</b>				
<b>Tamaño Tarjeta (cm)</b>		<b>0,5</b>				
<b>Elemento</b>	<b>%masa</b>	<b>Intensidad elemento (cps/μA)</b>	<b>Intensidad Estándar (cps/μA)</b>	<b>Contante de Sensibilidad</b>	<b>Concentración Estándar (mg/L)</b>	<b>Concentración del elemento (mg/L)</b>
<b>Fe</b>	0	0	117,935	1	2	0,00
<b>Ni</b>	0,419	0,0056	55,46	1	2	2,02E-04
<b>Cu</b>	92,9	0,012	52,426	1	2	4,58E-04
<b>Ag</b>	0,959	0,0019	NC	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	4,6	0,0533	NC	NC	NC	NC
<b>Au</b>	0,278	0,0442	NC	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	1,7	0,11	83,643	1	2	2,63E-03

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XXIII. **Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 2:2, tamaño de tarjeta 1,0 cm, corrida 1**

Corrida		1				
Relación agua regia		2:2				
Tamaño Tarjeta (cm)		1,0				
Elemento	%masa	Intensidad elemento (cps/ $\mu$ A)	Intensidad Estándar (cps/ $\mu$ A)	Contante de Sensibilidad	Concentración Estándar (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
Fe	0	0	117,935	1	2	0,00
Ni	0,0733	0,0245	55,46	1	2	8,84E-04
Cu	74,8	0,006	52,426	1	2	2,29E-04
Ag	0,0486	0,0047	NC	NC	NC	NC
Sn	2,31	0,0346	NC	NC	NC	NC
Au	0,0342	0,011	NC	NC	NC	NC
Pb	0	0	83,643	1	2	0,00

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XXIV. **Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 2:2, tamaño de tarjeta 1,0 cm, corrida 2**

Corrida		2				
Relación agua regia		2:2				
Tamaño Tarjeta (cm)		1,0				
Elemento	%masa	Intensidad elemento (cps/ $\mu$ A)	Intensidad Estándar (cps/ $\mu$ A)	Contante de Sensibilidad	Concentración Estándar (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
Fe	0	0	117,935	1	2	0,00



Continuación tabla XXIV

<b>Ni</b>	1,15	0,0415	55,46	1	2	1,50E-03
<b>Cu</b>	93,2	0,0121	52,426	1	2	4,62E-04
<b>Ag</b>	0,105	0,0018	NC	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	4,29	0,0535	NC	NC	NC	NC
<b>Au</b>	0,415	0,0555	NC	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	0,829	0,0797	83,643	1	2	1,91E-03

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

**Tabla XXV. Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 2:2, tamaño de tarjeta 1,0 cm, corrida 3**

<b>Corrida</b>		3				
<b>Relación agua regia</b>		2:2				
<b>Tamaño Tarjeta (cm)</b>		1,0				
<b>Elemento</b>	<b>%masa</b>	<b>Intensidad elemento (cps/<math>\mu</math>A)</b>	<b>Intensidad Estándar (cps/<math>\mu</math>A)</b>	<b>Contante de Sensibilidad</b>	<b>Concentración Estándar (mg/L)</b>	<b>Concentración del elemento (mg/L)</b>
<b>Fe</b>	0	0	117,935	1	2	0,00
<b>Ni</b>	0,611	0,0153	55,46	1	2	5,52E-04
<b>Cu</b>	95	0,0028	52,426	1	2	1,07E-04
<b>Ag</b>	0,08	0,0015	NC	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	3,43	0,0456	NC	NC	NC	NC
<b>Au</b>	0	0	NC	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	0,86	0,0828	83,643	1	2	1,98E-03

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XXVI. **Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 2:2, tamaño de tarjeta 1,5 cm, corrida 1**

Corrida		1				
Relación agua regia		2:2				
Tamaño Tarjeta (cm)		1,5				
Elemento	%masa	Intensidad elemento (cps/ $\mu$ A)	Intensidad Estándar (cps/ $\mu$ A)	Contante de Sensibilidad	Concentración Estándar (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
Fe	0	0	117,935	1	2	0,00
Ni	0	0	55,46	1	2	0,00
Cu	42,2	0,0635	52,426	1	2	2,42E-03
Ag	0,0396	0,0023	NC	NC	NC	NC
Sn	0	0	NC	NC	NC	NC
Au	0	0	NC	NC	NC	NC
Pb	0	0	83,643	1	2	0,00

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XXVII. **Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 2:2, tamaño de tarjeta 1,5cm, corrida 2**

Corrida		2				
Relación agua regia		2:2				
Tamaño Tarjeta (cm)		1,5				
Elemento	%masa	Intensidad elemento (cps/ $\mu$ A)	Intensidad Estándar (cps/ $\mu$ A)	Contante de Sensibilidad	Concentración Estándar (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
Fe	0	0	117,935	1	2	0,00

Continuación tabla XXVII

<b>Ni</b>	0,896	0,0401	55,46	1	2	1,45E-03
<b>Cu</b>	94,2	0,0118	52,426	1	2	4,50E-04
<b>Ag</b>	0,0868	0,0026	NC	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	4,31	0,0532	NC	NC	NC	NC
<b>Au</b>	0	0	NC	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	0,542	0,007	83,643	1	2	1,67E-04

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

**Tabla XXVIII. Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 2:2, tamaño de tarjeta 1,5 cm, corrida 3**

<b>Corrida</b>		<b>3</b>				
<b>Relación agua regia</b>		<b>2:2</b>				
<b>Tamaño Tarjeta (cm)</b>		<b>1,5</b>				
<b>Elemento</b>	<b>%masa</b>	<b>Intensidad elemento (cps/<math>\mu</math>A)</b>	<b>Intensidad Estándar (cps/<math>\mu</math>A)</b>	<b>Contante de Sensibilidad</b>	<b>Concentración Estándar (mg/L)</b>	<b>Concentración del elemento (mg/L)</b>
<b>Fe</b>	0	0	117,935	1	2	0,00
<b>Ni</b>	1,37	0,0458	55,46	1	2	1,65E-03
<b>Cu</b>	93,6	0,0041	52,426	1	2	1,56E-04
<b>Ag</b>	0,0581	0,0064	NC	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	4,09	0,0521	NC	NC	NC	NC
<b>Au</b>	0,44	0,06	NC	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	0,414	0,0046	83,643	1	2	1,10E-04

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XXIX. **Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 1:3, tamaño de tarjeta 0,5 cm, corrida 1**

Corrida		1				
Relación agua regia		1:3				
Tamaño Tarjeta (cm)		0,5				
Elemento	%masa	Intensidad elemento (cps/ $\mu$ A)	Intensidad Estándar (cps/ $\mu$ A)	Contante de Sensibilidad	Concentración Estándar (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
Fe	0	0	117,935	1	2	0,00
Ni	0,277	0,0189	55,46	1	2	6,82E-04
Cu	53,2	0,005	52,426	1	2	1,91E-04
Ag	0,0276	0,0039	NC	NC	NC	NC
Sn	1,52	0,0251	NC	NC	NC	NC
Au	0	0	NC	NC	NC	NC
Pb	0	0	83,643	1	2	0,00

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XXX. **Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 1:3, tamaño de tarjeta 0,5 cm, corrida 2**

Corrida		2				
Relación agua regia		1:3				
Tamaño Tarjeta (cm)		0,5				
Elemento	%masa	Intensidad elemento (cps/ $\mu$ A)	Intensidad Estándar (cps/ $\mu$ A)	Contante de Sensibilidad	Concentración Estándar (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
Fe	0	0	117,935	1	2	0,00

Continuación tabla XXX

<b>Ni</b>	0	0	55,46	1	2	0,00
<b>Cu</b>	94,5	0,001	52,426	1	2	3,81E-05
<b>Ag</b>	0,0707	0,008	NC	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	4,2	0,0672	NC	NC	NC	NC
<b>Au</b>	0,404	0,0593	NC	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	0,863	0,0047	83,643	1	2	1,12E-04

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

**Tabla XXXI. Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 1:3, tamaño de tarjeta 0,5 cm, corrida 3**

<b>Corrida</b>		3				
<b>Relación agua regia</b>		1:3				
<b>Tamaño Tarjeta (cm)</b>		0,5				
<b>Elemento</b>	<b>%masa</b>	<b>Intensidad elemento (cps/μA)</b>	<b>Intensidad Estándar (cps/μA)</b>	<b>Contante de Sensibilidad</b>	<b>Concentración Estándar (mg/L)</b>	<b>Concentración del elemento (mg/L)</b>
<b>Fe</b>	0	0	117,935	1	2	0,00
<b>Ni</b>	0	0	55,46	1	2	0,00
<b>Cu</b>	92,7	0,0125	52,426	1	2	4,77E-04
<b>Ag</b>	0,113	0,0045	NC	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	6,77	0,0827	NC	NC	NC	NC
<b>Au</b>	0	0	NC	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	0,464	0,0068	83,643	1	2	1,63E-04

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XXXII. **Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 1:3, tamaño de tarjeta 1,0 cm, corrida 1**

Corrida		1				
Relación agua regia		1:3				
Tamaño Tarjeta (cm)		1,0				
Elemento	%masa	Intensidad elemento (cps/ $\mu$ A)	Intensidad Estándar (cps/ $\mu$ A)	Contante de Sensibilidad	Concentración Estándar (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
Fe	0	0	117,935	1	2	0,00
Ni	0	0	55,46	1	2	0,00
Cu	55,3	0,005	52,426	1	2	1,91E-04
Ag	0,0426	0,0007	NC	NC	NC	NC
Sn	1,4	0,0244	NC	NC	NC	NC
Au	0	0	NC	NC	NC	NC
Pb	0	0	83,643	1	2	0,00

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XXXIII. **Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 1:3, tamaño de tarjeta 1,0 cm, corrida 2**

Corrida		2				
Relación agua regia		1:3				
Tamaño Tarjeta (cm)		1,0				
Elemento	%masa	Intensidad elemento (cps/ $\mu$ A)	Intensidad Estándar (cps/ $\mu$ A)	Contante de Sensibilidad	Concentración Estándar (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
Fe	0	0	117,935	1	2	0,00

Continuación tabla XXXIII

<b>Ni</b>	0	0	55,46	1	2	0,00
<b>Cu</b>	92,9	0,0127	52,426	1	2	4,84E-04
<b>Ag</b>	0,0688	0,0088	NC	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	5,72	0,0789	NC	NC	NC	NC
<b>Au</b>	0,456	0,0611	NC	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	0,902	0,008	83,643	1	2	1,91E-04

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XXXIV. **Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 1:3, tamaño de tarjeta 1,0 cm, corrida 3**

<b>Corrida</b>		3				
<b>Relación agua regia</b>		1:3				
<b>Tamaño Tarjeta (cm)</b>		1,0				
<b>Elemento</b>	<b>%masa</b>	<b>Intensidad elemento (cps/<math>\mu</math>A)</b>	<b>Intensidad Estándar (cps/<math>\mu</math>A)</b>	<b>Contante de Sensibilidad</b>	<b>Concentración Estándar (mg/L)</b>	<b>Concentración del elemento (mg/L)</b>
<b>Fe</b>	0	0	117,935	1	2	0,00
<b>Ni</b>	0	0	55,46	1	2	0,00
<b>Cu</b>	90,9	0,0128	52,426	1	2	4,88E-04
<b>Ag</b>	0,202	0,0046	NC	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	8,44	0,0989	NC	NC	NC	NC
<b>Au</b>	0	0	NC	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	0,425	0,0064	83,643	1	2	1,53E-04

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XXXV. **Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 1:3, tamaño de tarjeta 1,5 cm, corrida 1**

<b>Corrida</b>		1				
<b>Relación agua regia</b>		1:3				
<b>Tamaño Tarjeta (cm)</b>		1,5				
<b>Elemento</b>	<b>%masa</b>	<b>Intensidad elemento (cps/<math>\mu</math>A)</b>	<b>Intensidad Estándar (cps/<math>\mu</math>A)</b>	<b>Contante de Sensibilidad</b>	<b>Concentración Estándar (mg/L)</b>	<b>Concentración del elemento (mg/L)</b>
<b>Fe</b>	0	0	117,935	1	2	0,00
<b>Ni</b>	0,101	0,0193	55,46	1	2	6,96E-04
<b>Cu</b>	53,5	0,0049	52,426	1	2	1,87E-04
<b>Ag</b>	0,0257	0,0036	NC	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	1,39	0,023	NC	NC	NC	NC
<b>Au</b>	0	0	NC	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	0	0	83,643	1	2	0,00

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XXXVI. **Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 1:3, tamaño de tarjeta 1,5 cm, corrida 2**

<b>Corrida</b>		2				
<b>Relación agua regia</b>		1:3				
<b>Tamaño Tarjeta (cm)</b>		1,5				
<b>Elemento</b>	<b>%masa</b>	<b>Intensidad elemento (cps/<math>\mu</math>A)</b>	<b>Intensidad Estándar (cps/<math>\mu</math>A)</b>	<b>Contante de Sensibilidad</b>	<b>Concentración Estándar (mg/L)</b>	<b>Concentración del elemento (mg/L)</b>
<b>Fe</b>	0	0	117,935	1	2	0,00



Continuación tabla XXXVI

<b>Ni</b>	0	0	55,46	1	2	0,00
<b>Cu</b>	95,4	0,0008	52,426	1	2	3,05E-05
<b>Ag</b>	0,0899	0,0025	NC	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	3,46	0,0576	NC	NC	NC	NC
<b>Au</b>	0,556	0,0685	NC	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	0,535	0,0052	83,643	1	2	1,24E-04

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XXXVII. **Cuantificación de elementos en la relación de agua regia 1:3, tamaño de tarjeta 1,5 cm, corrida 3**

<b>Corrida</b>		3				
<b>Relación agua regia</b>		1:3				
<b>Tamaño Tarjeta (cm)</b>		1,5				
<b>Elemento</b>	<b>%masa</b>	<b>Intensidad elemento (cps/<math>\mu</math>A)</b>	<b>Intensidad Estándar (cps/<math>\mu</math>A)</b>	<b>Contante de Sensibilidad</b>	<b>Concentración Estándar (mg/L)</b>	<b>Concentración del elemento (mg/L)</b>
<b>Fe</b>	0,27	0,0336	117,935	1	2	5,70E-04
<b>Ni</b>	1,27	0,0483	55,46	1	2	1,74E-03
<b>Cu</b>	91,9	0,0125	52,426	1	2	4,77E-04
<b>Ag</b>	0,0092	0,0038	NC	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	4,43	0,0663	NC	NC	NC	NC
<b>Au</b>	0,474	0,0475	NC	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	1,58	0,112	83,643	1	2	2,68E-03

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XXXVIII. **Pesos al final de la electrodeposición; relación 3:1, tres tamaños de tarjeta y tres corridas**

<b>Relación agua regia</b>		3:1			
<b>Tiempo (s)</b>		3 600			
<b>Intensidad Eléctrica (A)</b>		0,17			
<b>Voltaje (V)</b>		9			
<b>Corrida</b>	<b>Tamaño (cm)</b>	<b>Peso inicial llave (g)</b>	<b>Peso final llave (g)</b>	<b>Peso inicial cable (g)</b>	<b>Peso final cable (g)</b>
<b>1</b>	<b>0,5</b>	8,41	8,42	2,56	2,50
<b>2</b>		8,63	8,64	2,31	2,18
<b>3</b>		8,80	8,80	2,60	2,40
<b>1</b>	<b>1,0</b>	7,96	7,98	3,27	2,90
<b>2</b>		8,18	8,18	1,75	1,59
<b>3</b>		8,08	8,15	3,79	3,78
<b>1</b>	<b>1,5</b>	9,46	9,46	2,95	2,91
<b>2</b>		7,30	7,90	2,50	2,40
<b>3</b>		8,33	8,41	3,17	2,98

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XXXIX. Pesos al final de la electrodeposición; relación 2:2, con tres tamaños de tarjeta y tres corridas

Relación agua regia		2:2			
Tiempo (s)		3 600			
Intensidad Eléctrica (A)		0,17			
Voltaje (V)		9			
Corrida	Tamaño (cm)	Peso inicial llave (g)	Peso final llave (g)	Peso inicial cable (g)	Peso final cable (g)
1	0,5	8,67	8,68	2,82	2,66
2		8,90	8,90	2,60	1,80
3		7,78	7,79	2,44	2,29
1	1,0	7,30	7,30	2,81	2,65
2		8,00	8,10	1,80	1,50
3		8,83	8,85	2,64	2,50
1	1,5	7,31	7,35	3,35	3,30
2		8,06	8,09	3,45	3,43
3		10,75	10,76	2,29	2,10

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XL. **Pesos al final de la electrodeposición, relación 1:3, con tres tamaños de tarjeta y tres corridas**

<b>Relación agua regia</b>		1:3			
<b>Tiempo (s)</b>		3 600			
<b>Intensidad Eléctrica (A)</b>		0,17			
<b>Voltaje (V)</b>		9			
<b>Corrida</b>	<b>Tamaño (cm)</b>	<b>Peso inicial llave (g)</b>	<b>Peso final llave (g)</b>	<b>Peso inicial cable (g)</b>	<b>Peso final cable (g)</b>
<b>1</b>	<b>0,5</b>	7,10	7,25	3,40	3,30
<b>2</b>		10,30	10,90	2,50	2,30
<b>3</b>		9,60	9,80	1,90	1,70
<b>1</b>	<b>1,0</b>	7,60	7,70	2,20	2,10
<b>2</b>		11,19	11,50	2,57	2,00
<b>3</b>		9,20	9,20	1,60	1,50
<b>1</b>	<b>1,5</b>	7,50	7,60	3,30	3,20
<b>2</b>		9,00	9,10	2,20	1,90
<b>3</b>		8,30	8,30	1,80	1,80

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

### 3.7. **Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información**

En el estudio de investigación; se tabularán, ordenarán y procesarán los datos obtenidos en la evaluación del porcentaje de extracción de metales y la recuperación de cobre en las diferentes relaciones de agua regia y tamaño de partícula, de las tarjetas de celulares descartados. Elaborando con los datos obtenidos las siguientes tablas:

Tabla XLI. **Porcentaje masa de hierro obtenido en las tres relaciones de agua regia, con tres tamaños de tarjeta y tres corridas**

Elemento		Fe			
Relación agua regia	Corrida	Tamaño (cm)	%masa	$\bar{X}$	S
3:1	1	0,5	0	0,1030	0,1784
	2		0		
	3		0,309		
	1	1,0	0	0,3900	0,6755
	2		0		
	3		1,17		
	1	1,5	0	0	0,0000
	2		0		
	3		0		
2:2	1	0,5	0	0	0,0000
	2		0		
	3		0		
	1	1,0	0	0	0,0000
	2		0		
	3		0		
	1	1,5	0	0	0,0000
	2		0		
	3		0		

Continuación tabla XLI

1:3	1	0,5	0	0	0,0000
	2		0		
	3		0		
	1	1,0	0	0	0,0000
	2		0		
	3		0		
	1	1,5	0	0,0900	0,1559
	2		0		
	3		0,27		

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XLII. **Porcentaje masa de níquel obtenido en las tres relaciones de agua regia, con tres tamaños de tarjeta y tres corridas**

Elemento			Ni		
Relación agua regia	Corrida	Tamaño (cm)	%masa	$\bar{X}$	s
3:1	1	0,5	0	0,5927	0,9598
	2		0,078		
	3		1,7		
	1	1,0	0	0,6000	0,6379
	2		0,53		
	3		1,27		
	1	1,5	0	0,4503	0,5048
	2		0,996		
	3		0,355		
2	0,853				
3	0,419				

Continuación tabla XLII

2:2	1	0,5	0,113	0,4617	0,3718
	2		0,853		
	3		0,419		
	1	1,0	0,0733	0,6114	0,5384
	2		1,15		
	3		0,611		
	1	1,5	0	0,7553	0,6957
	2		0,896		
	3		1,37		
1:3	1	0,5	0,277	0,0923	0,1599
	2		0		
	3		0		
	1	1,0	0	0,0000	0,0000
	2		0		
	3		0		
	1	1,5	0,101	0,4570	0,7059
	2		0		
	3		1,27		

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XLIII. **Porcentaje masa de cobre obtenido en las tres relaciones de agua regia, con tres tamaños de tarjeta y tres corridas**

Elemento			Cu		
Relación agua regia	Corrida	Tamaño (cm)	%masa	$\bar{X}$	S
3:1	1	0,5	26,4	70,6667	38,3518
	2		93,9		
	3		91,7		

Continuación tabla XLIII

3:1	1	1,0	14,7	67,1333	45,4148
	2		94,1		
	3		92,6		
	1	1,5	28,6	61,8000	32,9528
	2		94,5		
	3		62,3		
2:2	1	0,5	48,1	78,6667	26,4923
	2		95		
	3		92,9		
	1	1,0	74,8	87,6667	11,1791
	2		93,2		
	3		95		
	1	1,5	42,2	76,6667	29,8505
	2		94,2		
	3		93,6		
1:3	1	0,5	53,2	80,1333	23,3423
	2		94,5		
	3		92,7		
	1	1,0	55,3	79,7000	21,1547
	2		92,9		
	3		90,9		
	1	1,5	53,5	80,2667	23,2466
	2		95,4		
	3		91,9		

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.



Tabla XLIV. Porcentaje masa de plata obtenido en tres relaciones de agua regia, tres tamaños de tarjeta y tres corridas

Elemento			Ag		
Relación agua regia	Corrida	Tamaño (cm)	%masa	$\bar{X}$	S
3:1	1	0,5	0,0374	0,0948	0,0497
	2		0,122		
	3		0,125		
	1	1,0	0	0,0656	0,0592
	2		0,115		
	3		0,0817		
	1	1,5	0,0903	0,0659	0,0490
	2		0,0979		
	3		0,00952		
2:2	1	0,5	0	0,3537	0,5267
	2		0,102		
	3		0,959		
	1	1,0	0,0486	0,0779	0,0283
	2		0,105		
	3		0,08		
	1	1,5	0,0396	0,0615	0,0238
	2		0,0868		
	3		0,0581		
1:3	1	0,5	0,0276	0,0704	0,0427
	2		0,0707		
	3		0,113		
	1	1,0	0,0426	0,1045	0,0855
	2		0,0688		
	3		0,202		
	1	1,5	0,0257	0,0416	0,0426
	2		0,0899		
	3		0,0092		

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XLV. **Porcentaje masa de estaño obtenido en tres relaciones de agua regia, tres tamaños de tarjeta y tres corridas**

Elemento			Sn		
Relación agua regia	Corrida	Tamaño (cm)	%masa	$\bar{X}$	s
3:1	1	0,5	1,62	3,8433	1,9436
	2		5,22		
	3		4,69		
	1	1,0	0,281	2,8937	2,3109
	2		4,67		
	3		3,73		
	1	1,5	3,15	3,5867	0,4618
	2		4,07		
	3		3,54		
2:2	1	0,5	1,26	3,3067	1,7929
	2		4,06		
	3		4,6		
	1	1,0	2,31	3,3433	0,9928
	2		4,29		
	3		3,43		
	1	1,5	0	2,8000	2,4274
	2		4,31		
	3		4,09		
1:3	1	0,5	1,52	4,1633	2,6252
	2		4,2		
	3		6,77		

Continuación tabla XLV

1:3	1	1,0	1,4	5,1867	3,5502
	2		5,72		
	3		8,44		
	1	1,5	1,39	3,0933	1,5528
	2		3,46		
	3		4,43		

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XLVI. **Porcentaje masa de oro obtenido en tres relaciones de agua regia, tres tamaños de tarjeta y tres corridas**

Elemento			Au		
Relación agua regia	Corrida	Tamaño (cm)	%masa	$\bar{X}$	S
3:1	1	0,5	0,0481	0,2044	0,3132
	2		0		
	3		0,565		
	1	1,0	0,0178	0,0059	0,0103
	2		0		
	3		0		
	1	1,5	0	0,0042	0,0072
	2		0		
	3		0,0125		
2:2	1	0,5	0	0,0927	0,1605
	2		0		
	3		0,278		

Continuación tabla XLVI

2:2	1	1,0	0,0342	0,1497	0,2304
	2		0,415		
	3		0		
	1	1,5	0	0,1467	0,2540
	2		0		
	3		0,44		
1:3	1	0,5	0	0,1347	0,2332
	2		0,404		
	3		0		
	1	1,0	0	0,1520	0,2633
	2		0,456		
	3		0		
	1	1,5	0	0,3433	0,3001
	2		0,556		
	3		0,474		

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XLVII. **Porcentaje masa de plomo obtenido en las tres relaciones de agua regia, con tres tamaños de tarjeta y tres corridas**

Elemento			Pb	$\bar{X}$	s
Relación agua regia	Corrida	Tamaño (cm)	%masa		
3:1	1	0,5	0,0289	0,2986	0,49243203
	2		0		
	3		0,867		
	1	1,0	0	0,3633	0,31572826
	2		0,571		
	3		0,519		

Continuación tabla XLVII

3:1	1	1,5	0,0283	0,1448	0,22667678
	2		0,406		
	3		0		
2:2	1	0,5	0,0721	0,5907	0,96135814
	2		0		
	3		1,7		
	1	1,0	0	0,5630	0,48781861
	2		0,829		
	3		0,86		
1	1,5	0	0,3187	0,28329725	
2		0,542			
3		0,414			
1:3	1	0,5	0	0,4423	0,43190778
	2		0,863		
	3		0,464		
	1	1,0	0	0,4423	0,45124975
	2		0,902		
	3		0,425		
	1	1,5	0	0,7050	0,80360127
	2		0,535		
	3		1,58		

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

**Tabla XLVIII. Masa teórica de recuperación de cobre en la relación de agua regia 3:1, con tres tamaños de tarjeta y tres corridas**

<b>Relación agua regia</b>	3:1
<b>Tiempo (s)</b>	3 600
<b>Intensidad Eléctrica (A)</b>	0,17
<b>Voltaje (V)</b>	9

Continuación tabla XLVIII

Corrida	Tamaño (cm)	Peso inicial llave (g)	Peso final llave (g)	Peso Cu depositado (g)	$\bar{X}$	S
1	0,5	8,41	8,42	0,01	0,0067	0,0058
2		8,63	8,64	0,01		
3		8,80	8,80	0		
1	1,0	7,96	7,98	0,02	0,0300	0,0361
2		8,18	8,18	0		
3		8,08	8,15	0,07		
1	1,5	9,46	9,46	0	0,2267	0,3258
2		7,30	7,90	0,6		
3		8,33	8,41	0,08		

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla XLIX. **Masa teórica de recuperación de cobre en la relación de agua regia 2:2, con tres tamaños de tarjeta y tres corridas**

Relación agua regia		2:2				
Tiempo (s)		3 600				
Intensidad Eléctrica (A)		0,17				
Voltaje (V)		9				
Corrida	Tamaño (cm)	Peso inicial llave (g)	Peso final llave (g)	Peso Cu depositado (g)	$\bar{X}$	S
1	0,5	8,67	8,68	0,01	0,0067	0,0058
2		8,90	8,90	0		

Continuación tabla XLIX

<b>3</b>		7,78	7,79	0,01		
<b>1</b>	<b>1,0</b>	7,30	7,30	0	0,0400	0,0529
<b>2</b>		8,00	8,10	0,1		
<b>3</b>		8,83	8,85	0,02		
<b>1</b>	<b>1,5</b>	7,31	7,35	0,04	0,0267	0,0153
<b>2</b>		8,06	8,09	0,03		
<b>3</b>		10,75	10,76	0,01		

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

Tabla L. **Masa teórica de recuperación de cobre en la relación de agua regia 1:3, con tres tamaños de tarjeta y tres corridas**

<b>Relación agua regia</b>		1:3				
<b>Tiempo (s)</b>		3 600				
<b>Intensidad Eléctrica (A)</b>		0,17				
<b>Voltaje (V)</b>		9				
<b>Corrida</b>	<b>Tamaño (cm)</b>	<b>Peso inicial llave (g)</b>	<b>Peso final llave (g)</b>	<b>Peso Cu depositado (g)</b>	$\bar{X}$	<b>s</b>
<b>1</b>	<b>0,5</b>	7,10	7,25	0,15	0,3167	0,2466
<b>2</b>		10,30	10,90	0,6		
<b>3</b>		9,60	9,80	0,2		
<b>1</b>	<b>1,0</b>	7,60	7,70	0,1	0,1367	0,1582
<b>2</b>		11,19	11,50	0,31		
<b>3</b>		9,20	9,20	0		

Continuación tabla L

1	1,5	7,50	7,60	0,1	0,0667	0,0577
2		9,00	9,10	0,1		
3		8,30	8,30	0		

Fuente: datos experimentales, LAFIQ/USAC.

### 3.8. Análisis Estadístico

Para el análisis de los datos obtenidos a nivel laboratorio se utilizó la teoría de pequeñas muestras. Se seleccionó la T-Student para este propósito por su facilidad de aplicación, con un nivel de confianza unilateral al 95 %.

Para la evaluación de pruebas de hipótesis con la distribución T-Student se hace una comparación entre dos valores de T dados por las especificaciones de un valor alfa ( $\alpha$ ) y los grados de libertad calculados para la serie de datos, valor que es determinado por tablas ya creadas para diferentes niveles de confianza y grados de libertad que trabaje la distribución analizada, con un valor de T calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$T = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$$

Dependiendo de los criterios que la prueba de T-Student utilizada, la hipótesis nula propuesta puede ser aceptada o rechazada, según sean los valores para la F teórica y el valor de la F calculada.



### 3.8.1. Regla de decisión

- Si  $F \geq F_t$ : Se rechaza la hipótesis nula (es decir, sí existen diferencias significativas).
- Si  $F < F_t$ : Se acepta la hipótesis nula.



## 4. RESULTADOS

Tabla LI. **Porcentaje de masa obtenido con relación de agua regia 3:1, en tamaños de tarjeta de 0,5 cm en tres corridas**

Elemento	%masa corrida 1	%masa corrida 2	%masa corrida 3
Fe	0,000	0,000	0,309
Ni	0,000	0,078	1,700
Cu	26,400	93,900	91,700
Ag	0,037	0,122	0,125
Sn	1,620	5,220	4,690
Au	0,048	0,000	0,565
Pb	0,028	0,000	0,867

Fuente: elaboración propia.

Tabla LII. **Porcentaje de masa obtenido con relación de agua regia 3:1, en tamaños de tarjeta de 1,0 cm en tres corridas**

Elemento	%masa corrida 1	%masa corrida 2	%masa corrida 3
Fe	0,000	0,000	1,770
Ni	0,000	0,530	1,270
Cu	14,700	94,100	92,600
Ag	0,000	0,115	0,082

Continuación Tabla LII

<b>Sn</b>	0,281	4,670	3,730
<b>Au</b>	0,017	0,000	0,000
<b>Pb</b>	0,00	0,571	0,519

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIII. **Porcentaje de masa obtenido con relación de agua regia 3:1, en tamaños de tarjeta de 1,5 cm en tres corridas**

<b>Elemento</b>	<b>%masa corrida 1</b>	<b>%masa corrida 2</b>	<b>%masa corrida 3</b>
<b>Fe</b>	0,000	0,000	0,000
<b>Ni</b>	0,000	0,966	0,355
<b>Cu</b>	28,600	94,500	62,300
<b>Ag</b>	0,090	0,097	0,009
<b>Sn</b>	3,150	4,070	3,540
<b>Au</b>	0,000	0,000	0,012
<b>Pb</b>	0,028	0,406	0,000

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIV. **Comparación de promedios de corridas de porcentajes masas en tres tamaños de tarjeta y relación de agua regia 3:1**

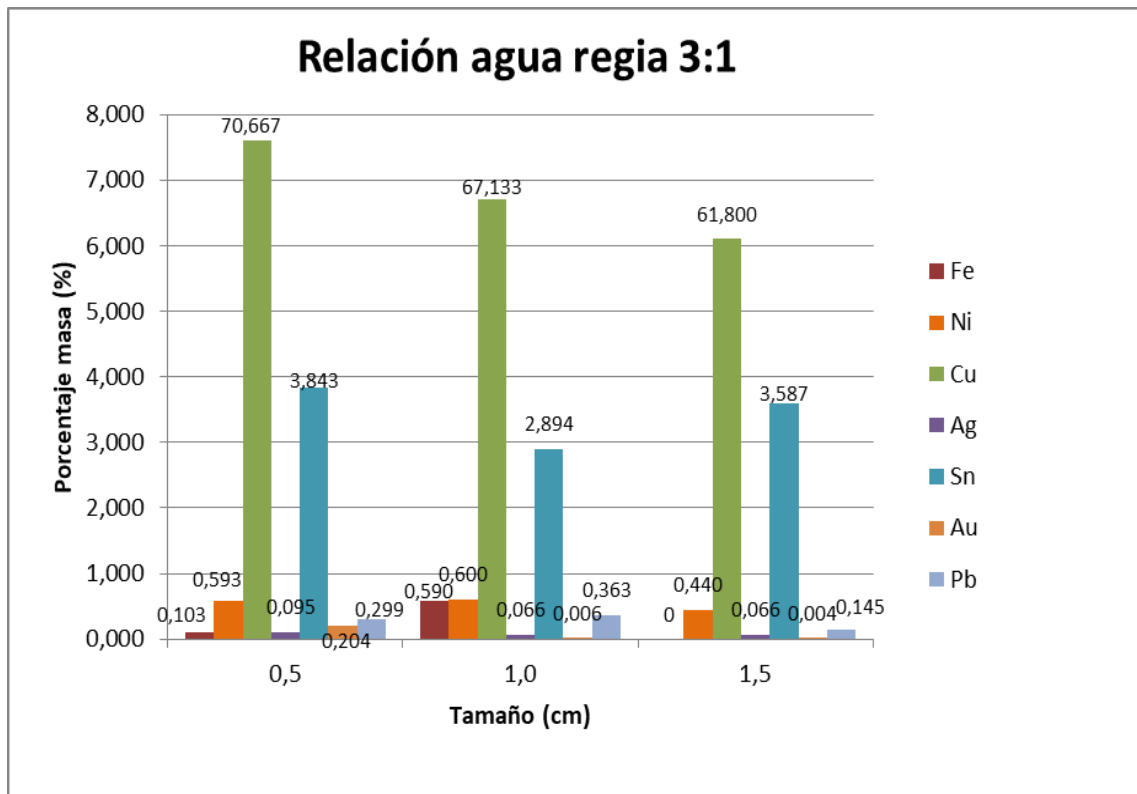
<b>Elemento</b>	<b>0,5 cm</b>	<b>1,0 cm</b>	<b>1,5 cm</b>
	<b>%masa</b>	<b>%masa</b>	<b>%masa</b>
<b>Fe</b>	0,1030	0,5900	0,0000

Continuación Tabla LIV

<b>Ni</b>	0,5927	0,6000	0,4403
<b>Cu</b>	70,6667	67,1333	61,8000
<b>Ag</b>	0,0948	0,0656	0,0659
<b>Sn</b>	3,8433	2,8937	3,5867
<b>Au</b>	0,2044	0,0059	0,0042
<b>Pb</b>	0,2986	0,3633	0,1448

Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Comparación de promedios de corridas de porcentajes masas, tres tamaños de tarjeta y relación 3:1**



Fuente: elaboración propia.

Tabla LV. **Porcentaje de masa obtenido con relación de agua regia 2:2, en tamaños de tarjeta de 0,5 cm en tres corridas**

<b>Elemento</b>	<b>%masa corrida 1</b>	<b>%masa corrida 2</b>	<b>%masa corrida 3</b>
<b>Fe</b>	0,000	0,000	0,000
<b>Ni</b>	0,113	0,853	0,419
<b>Cu</b>	48,100	95,000	92,900
<b>Ag</b>	0,000	0,102	0,959
<b>Sn</b>	1,260	4,060	4,600
<b>Au</b>	0,000	0,000	0,278
<b>Pb</b>	0,072	0,000	1,700

Fuente: elaboración propia.

Tabla LVI. **Porcentaje de masa obtenido con relación de agua 2:2, en tamaños de tarjeta de 1,0 cm en tres corridas**

<b>Elemento</b>	<b>%masa corrida 1</b>	<b>%masa corrida 2</b>	<b>%masa corrida 3</b>
<b>Fe</b>	0,000	0,000	0,000
<b>Ni</b>	0,073	1,150	0,611
<b>Cu</b>	74,800	93,200	95,000
<b>Ag</b>	0,048	0,105	0,080
<b>Sn</b>	2,310	4,290	3,430
<b>Au</b>	0,034	0,415	0,000
<b>Pb</b>	0,000	0,829	0,860

Fuente: elaboración propia.

Tabla LVII. **Porcentaje de masa obtenido con relación de agua regia 2:2, en tamaños de tarjeta de 1,5 cm en tres corridas**

Elemento	%masa corrida 1	%masa corrida 2	%masa corrida 3
Fe	0,000	0,000	0,000
Ni	0,000	0,896	1,370
Cu	42,200	94,200	93,600
Ag	0,039	0,086	0,058
Sn	0,000	4,310	4,090
Au	0,000	0,000	0,440
Pb	0,000	0,542	0,414

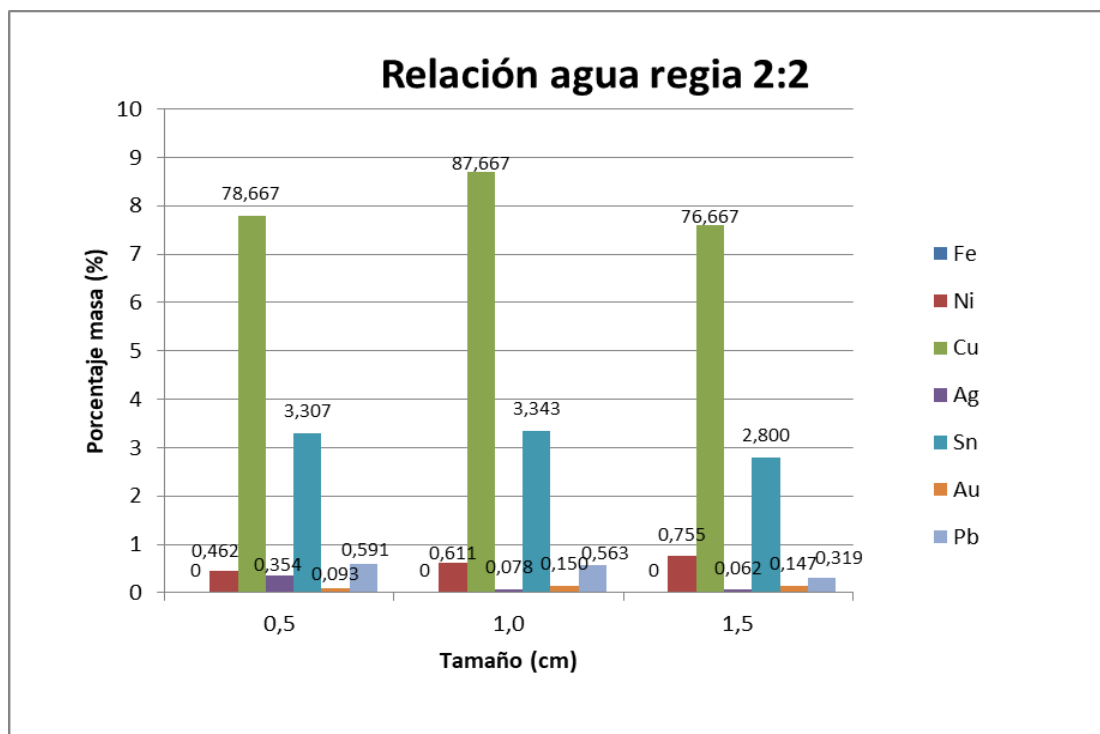
Fuente: elaboración propia.

Tabla LVIII. **Comparación de promedios de corridas de porcentajes masas en tres tamaños de tarjeta y relación de agua regia 2:2**

Elemento	0,5 cm	1,0 cm	1,5 cm
	%masa	%masa	%masa
Fe	0	0	0
Ni	0,4617	0,6114	0,7553
Cu	78,6667	87,6667	76,6667
Ag	0,3537	0,0779	0,0615
Sn	3,3067	3,3433	2,8000
Au	0,0927	0,1497	0,1467
Pb	0,5907	0,5630	0,3187

Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Comparación de promedios de corridas de porcentajes masas, tres tamaños de tarjeta y relación 2:2**



Fuente: elaboración propia.

Tabla LIX. **Porcentaje de masa obtenido con relación de agua regia 1:3, en tamaños de tarjeta de 0,5 cm en tres corridas**

Elemento	%masa corrida 1	%masa corrida 2	%masa corrida 3
Fe	0,000	0,000	0,000
Ni	0,277	0,000	0,000
Cu	53,200	94,500	92,700
Ag	0,027	0,070	0,113



Continuación Tabla LIX

<b>Sn</b>	1,520	4,200	6,770
<b>Au</b>	0,000	0,404	0,000
<b>Pb</b>	0,000	0,863	0,464

Fuente: elaboración propia.

Tabla LX. **Porcentaje de masa obtenido con relación de agua regia 1:3, en tamaños de tarjeta de 1,0 cm en tres corridas**

<b>Elemento</b>	<b>%masa corrida 1</b>	<b>%masa corrida 2</b>	<b>%masa corrida 3</b>
<b>Fe</b>	0,000	0,000	0,000
<b>Ni</b>	0,000	0,000	0,000
<b>Cu</b>	55,300	92,900	90,900
<b>Ag</b>	0,042	0,068	0,202
<b>Sn</b>	1,400	5,720	8,440
<b>Au</b>	0,000	0,456	0,000
<b>Pb</b>	0,000	0,902	0,425

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXI. **Porcentaje de masa obtenido con relación de agua regia 1:3, en tamaños de tarjeta de 1,5 cm en tres corridas**

<b>Elemento</b>	<b>%masa corrida 1</b>	<b>%masa corrida 2</b>	<b>%masa corrida 3</b>
<b>Fe</b>	0,000	0,000	0,270
<b>Ni</b>	0,101	0,000	1,270

Continuación Tabla LXI

<b>Cu</b>	53,500	95,400	91,900
<b>Ag</b>	0,025	0,089	0,009
<b>Sn</b>	1,390	3,460	4,430
<b>Au</b>	0,000	0,556	0,474
<b>Pb</b>	0,000	0,535	1,580

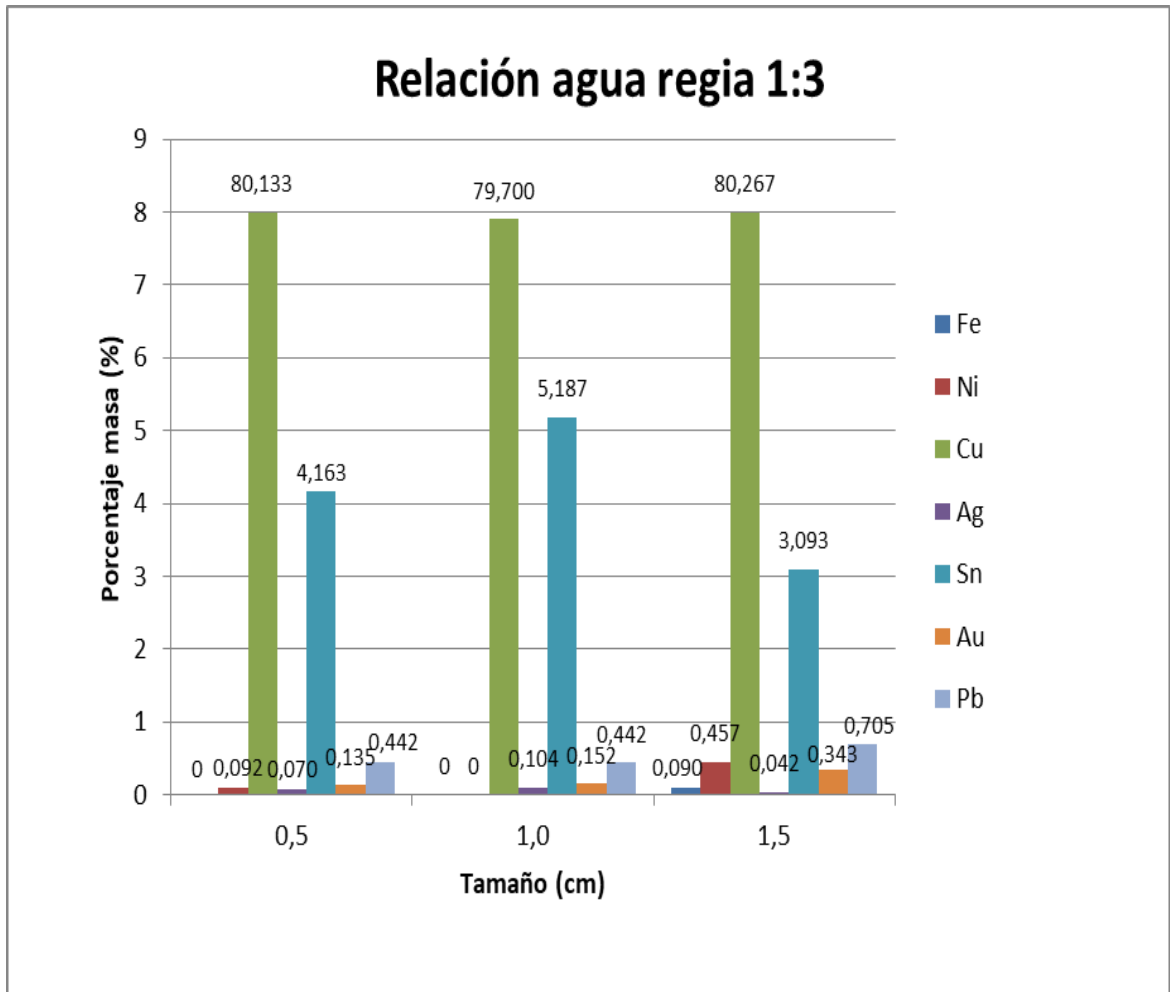
Fuente: elaboración propia.

Tabla LXII. **Comparación de promedios de corridas de porcentajes masas en tres tamaños de tarjeta y relación de agua regia 1:3**

<b>Elemento</b>	<b>0,5 cm</b>	<b>1,0 cm</b>	<b>1,5 cm</b>
	<b>%masa</b>	<b>%masa</b>	<b>%masa</b>
<b>Fe</b>	0,000	0,000	0,090
<b>Ni</b>	0,092	0,000	0,457
<b>Cu</b>	80,133	79,700	80,266
<b>Ag</b>	0,070	0,104	0,041
<b>Sn</b>	4,163	5,186	3,093
<b>Au</b>	0,134	0,152	0,343
<b>Pb</b>	0,442	0,442	0,705

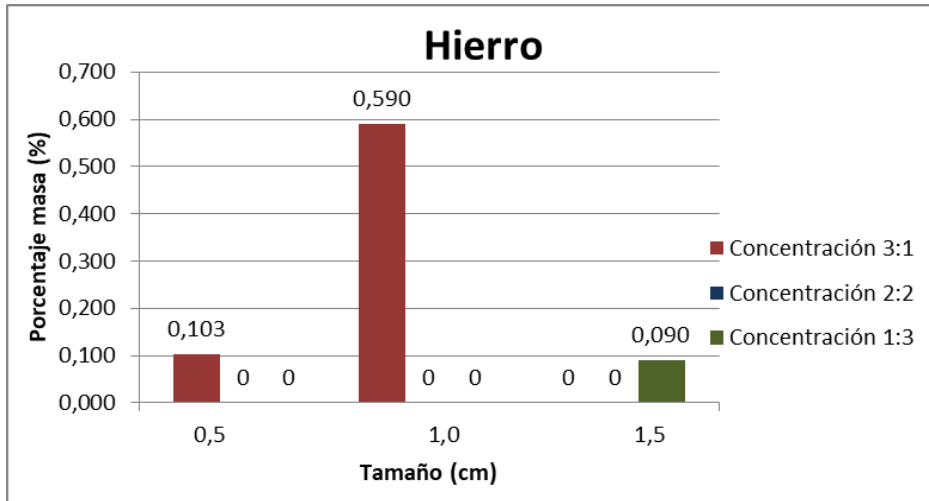
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Comparación de promedios de corridas de porcentajes masas, tres tamaños de tarjeta y relación 1:3



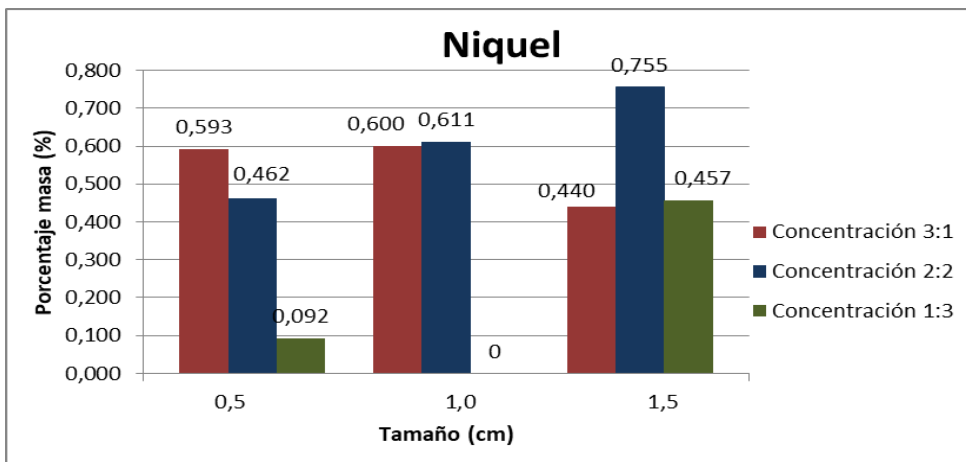
Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Comparación del porcentaje masa de Fe para las tres relaciones de agua regia y los tres tamaños**



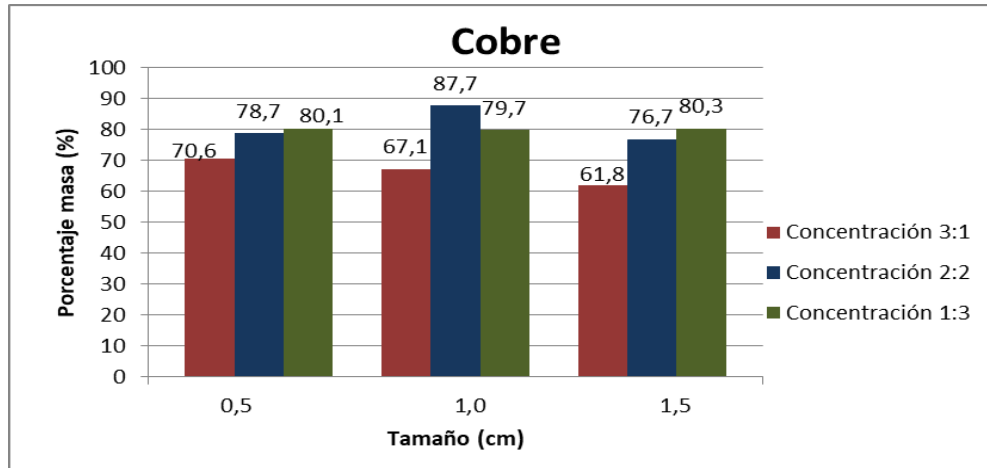
Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Comparación del porcentaje masa de Ni para las tres relaciones de agua regia y los tres tamaños**



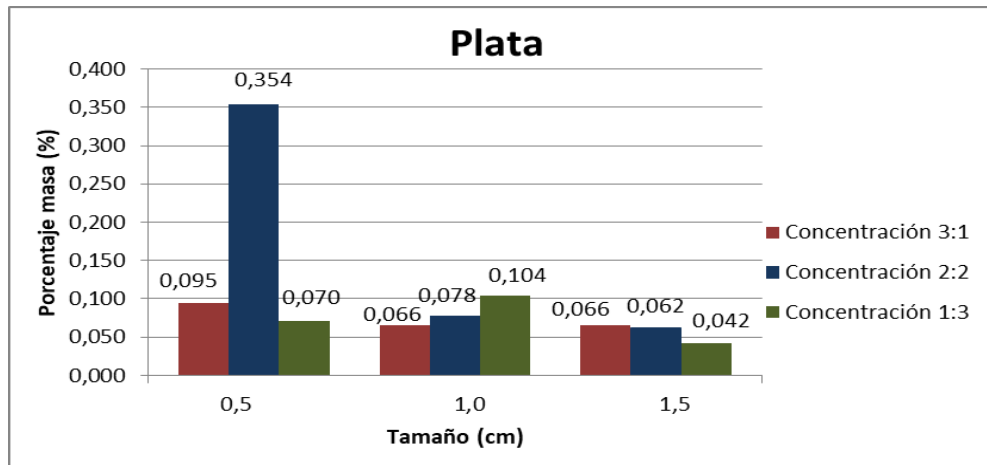
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Comparación del porcentaje masa de Cu para las tres relaciones de agua regia y los tres tamaños**



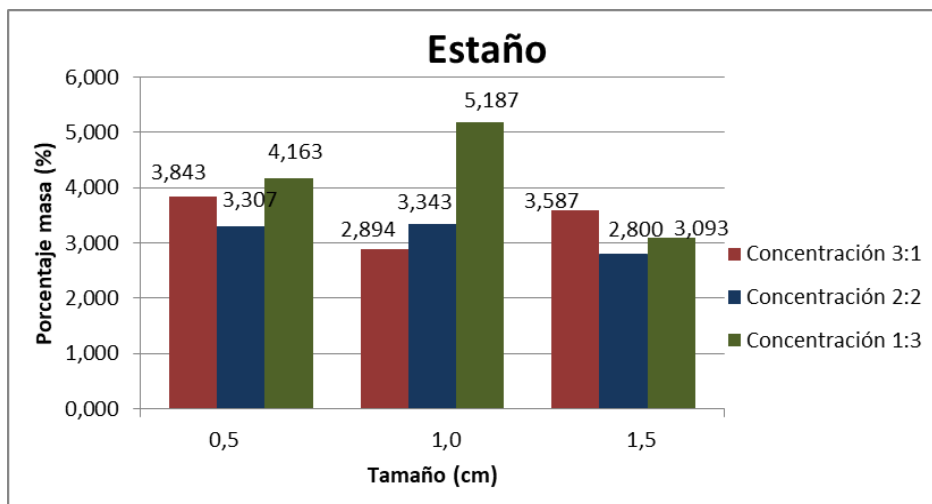
Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Comparación del porcentaje masa de Ag para las tres relaciones de agua regia y los tres tamaños**



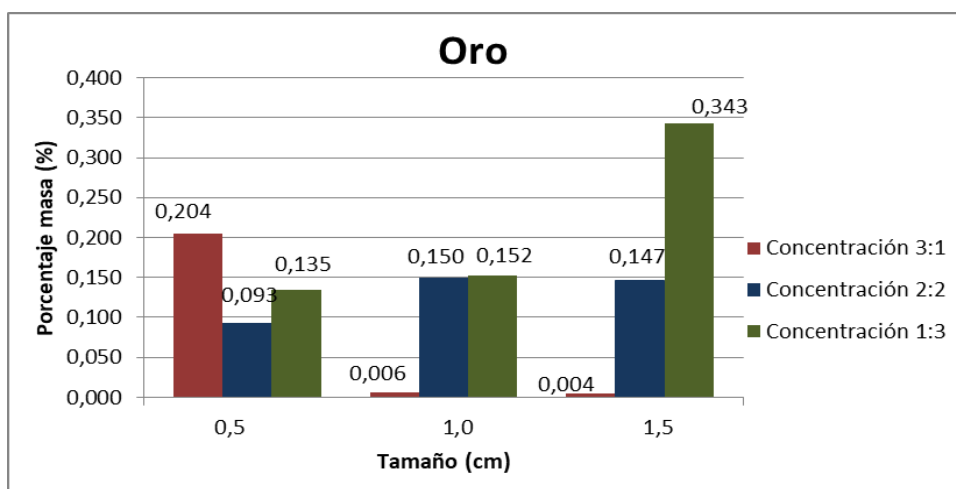
Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Comparación del porcentaje masa de Sn para las tres relaciones de agua regia y los tres tamaños**



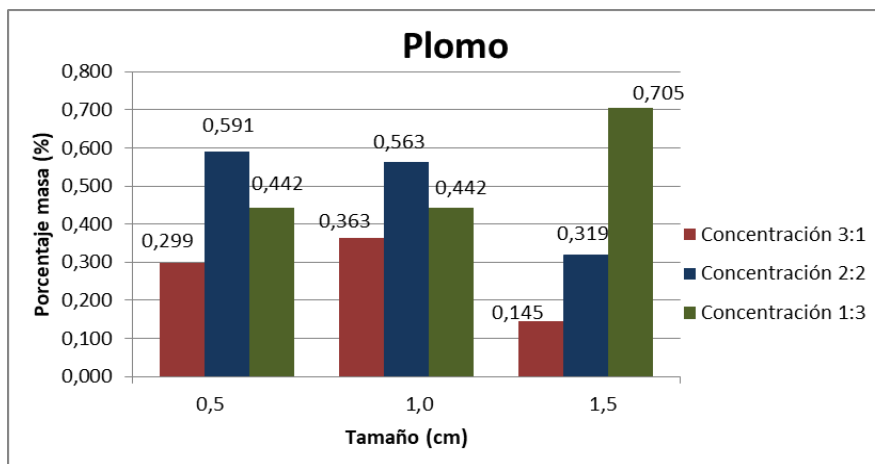
Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Comparación del porcentaje masa de Au para las tres relaciones de agua regia y los tres tamaños**



Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Comparación del porcentaje masa de Pb para las tres relaciones de agua regia y los tres tamaños**



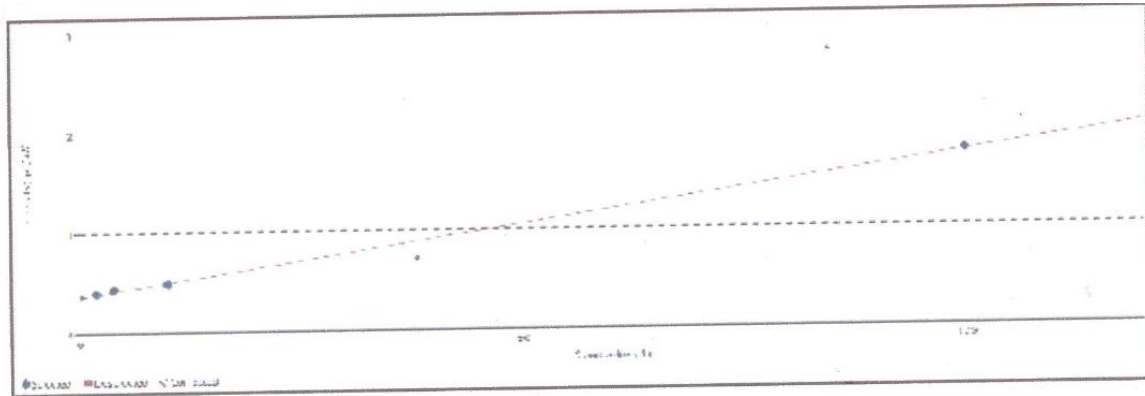
Fuente: elaboración propia.

Tabla LXIII. **Curva de calibración del hierro**

Elemento	Fe	
Estándar	Concentración (mg/L)	Intensidad cps/ $\mu$ A)
1	1,0	45,827
2	2,0	117,935
3	4,0	262,149
4	10,0	694,796
5	100,0	7194,450
	<b>Pendiente</b>	<b>72,107</b>
	<b>Intercepto</b>	<b>-26,280</b>
	<b>Coefficiente de correlación</b>	<b>1,000</b>

Fuente: Informe final de EPS, María Celeste Pelayes Guillen. p 40.

Figura 23. Representación gráfica de la curva de calibración del hierro



Fuente: Informe final de EPS, María Celeste Pelayes Guillen. p 40.

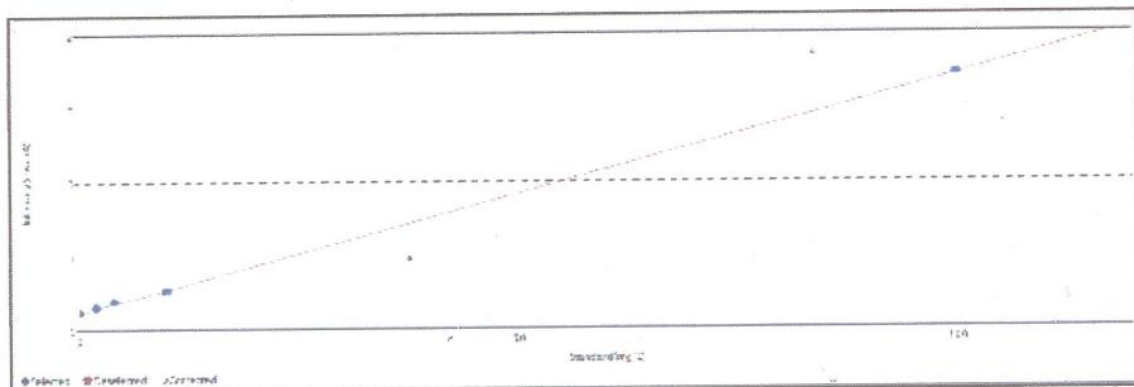
Tabla LXIV. Curva de calibración del plomo

Elemento	Pb	
Estándar	Concentración (mg/L)	Intensidad (cps/μA)
1	1,0	40,087
2	2,0	83,643
3	4,0	170,755
4	10,0	432,089
5	100,0	4352,111
	<b>Pendiente</b>	<b>43,555</b>
	<b>Intercepto</b>	<b>-3,468</b>
	<b>Coefficiente de correlación</b>	<b>1,000</b>

Fuente: Informe final de EPS, María Celeste Pelayes Guillen. p 41.



Figura 24. Representación gráfica de la curva de calibración del plomo



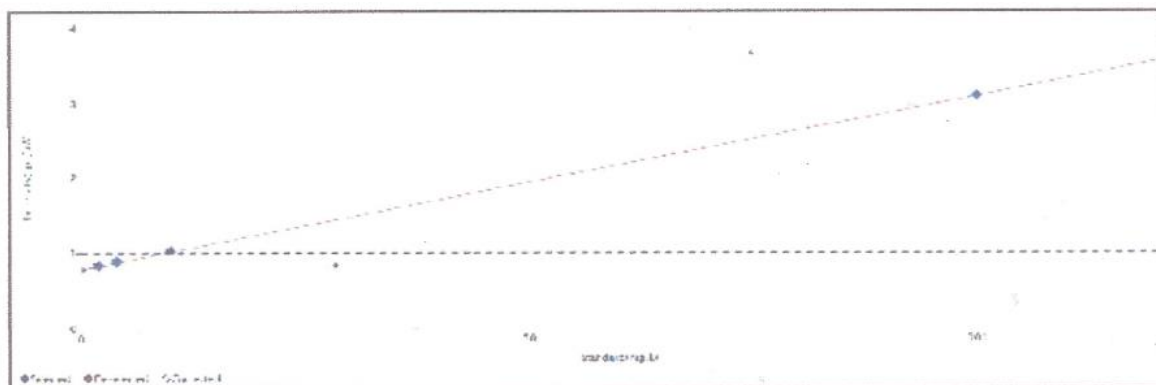
Fuente: Informe final de EPS, María Celeste Pelayes Guillen. p 41.

Tabla LXV. Curva de calibración del cobre

Elemento	Cu	
Estándar	Concentración (mg/L)	Intensidad (cps/ $\mu$ A)
1	1,0	8,870
2	2,0	52,426
3	4,0	139,538
4	10,0	400,872
5	100,0	4320,894
	<b>Pendiente</b>	<b>43,555</b>
	<b>Intercepto</b>	<b>-34,685</b>
	<b>Coefficiente de correlación</b>	<b>1,000</b>

Fuente: Informe final de EPS, María Celeste Pelayes Guillen. p 42.

Figura 25. Representación gráfica de la curva de calibración del cobre



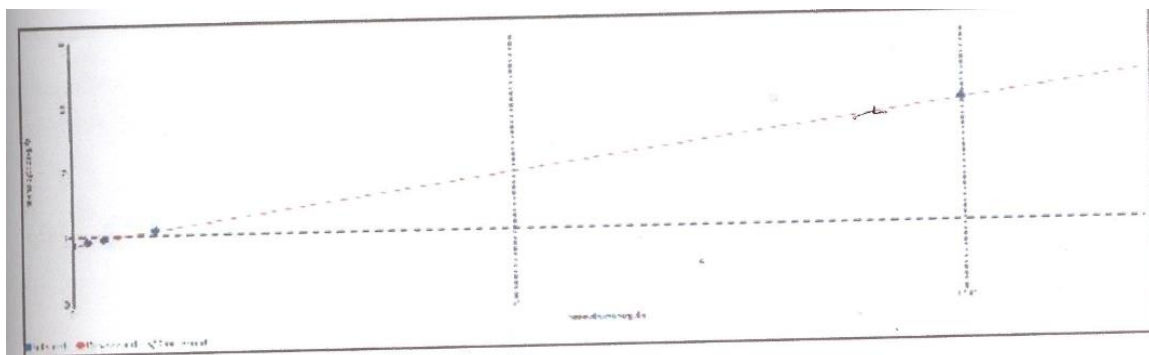
Fuente: Informe final de EPS, María Celeste Pelayes Guillen. p 42.

Tabla LXVI. Curva de calibración del níquel

Elemento	Ni	
Estándar	Concentración (mg/L)	Intensidad (cps/μA)
1	1,0	6,088
2	2,0	55,460
3	4,0	154,203
4	10,0	450,435
5	100,0	4893,906
	<b>Pendiente</b>	<b>49,371</b>
	<b>Intercepto</b>	<b>-43,284</b>
	<b>Coefficiente de correlación</b>	<b>1,000</b>

Fuente: Informe final de EPS, María Celeste Pelayes Guillen. p 43.

Figura 26. Representación gráfica de la curva de calibración del níquel



Fuente: Informe final de EPS, María Celeste Pelayes Guillen. p 43.

Tabla LXVII. Concentración obtenida con relación de agua regia 3:1, en tamaños de tarjeta de 0,5 cm en tres corridas

Elemento	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
Fe	0,00	0,00	5,77E-04
Ni	0,00	5,59E-04	1,61E-03
Cu	2,89E-03	4,39E-04	4,31E-04
Ag	NC	NC	NC
Sn	NC	NC	NC
Au	NC	NC	NC
Pb	2,87E-05	0,00	1,72E-04

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXVIII. **Concentración obtenida con relación de agua regia 3:1, en tamaños de tarjeta de 1,0 cm en tres corridas**

Elemento	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
Fe	0,00	0,00	5,73E-04
Ni	0,00	1,45E-03	1,47E-03
Cu	3,18E-04	4,27E-04	4,31E-04
Ag	NC	NC	NC
Sn	NC	NC	NC
Au	NC	NC	NC
Pb	0,00	1,55E-03	1,51E-04

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXIX. **Concentración obtenida con relación de agua regia 3:1, en tamaños de tarjeta de 1,5 cm en tres corridas**

Elemento	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
Fe	0,00	0,00	0,00
Ni	0,00	1,65E-03	4,51E-04
Cu	2,98E-04	1,22E-04	1,14E-04
Ag	NC	NC	NC
Sn	NC	NC	NC

Continuación tabla LXIX

<b>Au</b>	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	0,00	1,55E-03	1,51E-04

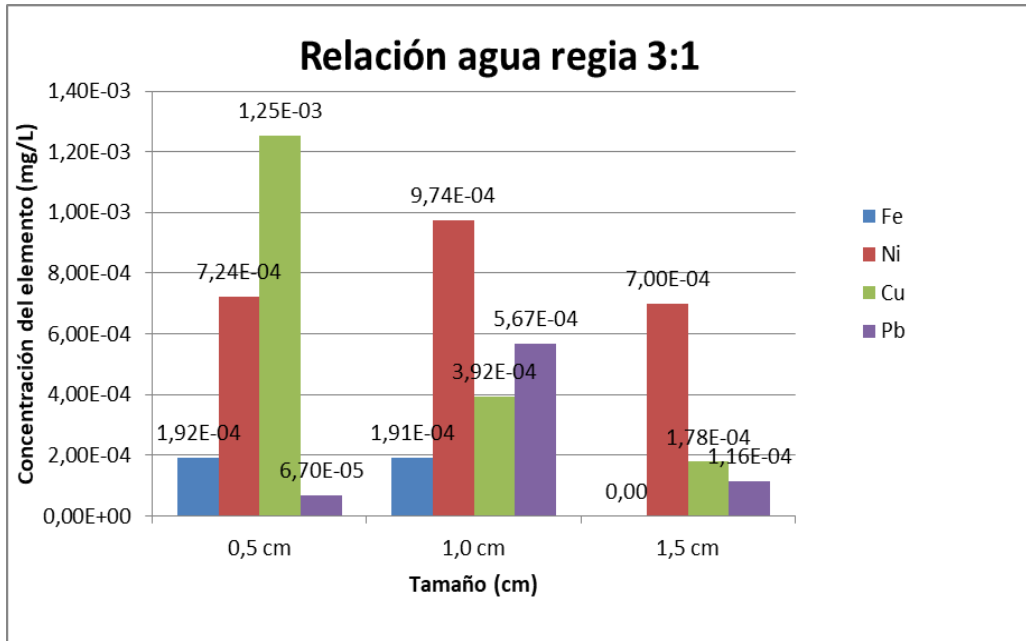
Fuente: elaboración propia.

Tabla LXX. **Comparación de promedios de concentraciones de los elementos en tres tamaños y relación 3:1**

<b>Elemento</b>	<b>Concentración del elemento (mg/L)</b>	<b>Concentración del elemento (mg/L)</b>	<b>Concentración del elemento (mg/L)</b>
	<b>0,5 cm</b>	<b>1,0 cm</b>	<b>1,5 cm</b>
<b>Fe</b>	1,92E-04	1,91E-04	0,00
<b>Ni</b>	7,24E-04	9,74E-04	7,00E-04
<b>Cu</b>	1,25E-03	3,92E-04	1,78E-04
<b>Ag</b>	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	NC	NC	NC
<b>Au</b>	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	6,70E-05	5,67E-04	1,16E-04

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Comparación de promedios de corridas de porcentajes de masas en tres tamaños y relación 3:1**



Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXI. **Concentración obtenida con relación de agua regia 2:2, en tamaños de tarjeta de 0,5 cm en tres corridas**

Elemento	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
Fe	0,00	0,00	0,00
Ni	7,32E-04	1,47E-03	2,02E-04
Cu	2,02E-03	4,50E-04	4,58E-04
Ag	NC	NC	NC

Continuación tabla LXXI

<b>Sn</b>	NC	NC	NC
<b>Au</b>	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	6,70E-05	5,67E-04	1,16E-04

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXII. **Concentración obtenida con relación de agua regia 2:2, en tamaños de tarjeta de 1,0 cm en tres corridas**

<b>Elemento</b>	<b>Concentración del elemento (mg/L)</b>	<b>Concentración del elemento (mg/L)</b>	<b>Concentración del elemento (mg/L)</b>
	<b>Corrida 1</b>	<b>Corrida 2</b>	<b>Corrida 3</b>
<b>Fe</b>	0,00	0,00	0,00
<b>Ni</b>	8,84E-04	1,50E-03	5,52E-04
<b>Cu</b>	2,29E-04	4,62E-04	1,07E-04
<b>Ag</b>	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	NC	NC	NC
<b>Au</b>	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	0,00	1,91E-03	1,98E-03

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXIII. **Concentración obtenida con relación de agua regia 2:2, en tamaños de tarjeta de 1,5 cm en tres corridas**

Elemento	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
<b>Fe</b>	0,00	0	0,00
<b>Ni</b>	0,00	1,45E-03	1,65E-03
<b>Cu</b>	2,42E-03	4,50E-04	1,56E-04
<b>Ag</b>	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	NC	NC	NC
<b>Au</b>	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	0,00	1,67E-04	1,10E-04

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXIV. **Comparación de promedios de corridas de porcentajes masas en tres tamaños y relación 2:2**

Elemento	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
	0,5 cm	1,0 cm	1,5 cm
<b>Fe</b>	0,00	0,00	0,00
<b>Ni</b>	8,01E-04	9,77E-04	1,03E-03
<b>Cu</b>	9,77E-04	2,66E-04	1,01E-03
<b>Ag</b>	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	NC	NC	NC

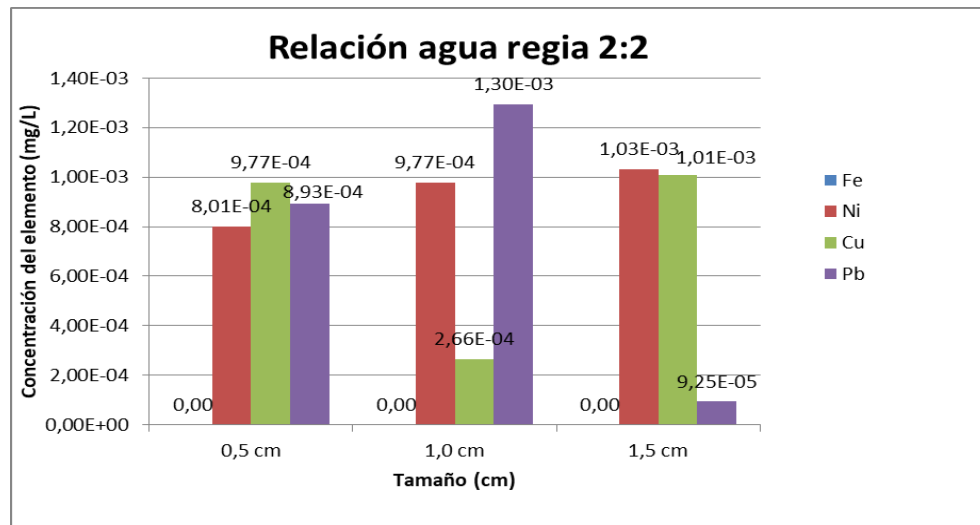


Continuación tabla LXXIV

<b>Au</b>	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	8,93E-04	1,30E-03	9,25E-05

Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Comparación de promedios de corridas de porcentajes masas en tres y relación 3:1**



Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXV. **Concentración obtenida con relación de agua regia 1:3, en tamaños de tarjeta de 0,5 cm en tres corridas**

Elemento	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3

Continuación tabla LXXV

<b>Fe</b>	0,00	0,00	0,00
<b>Ni</b>	6,82E-04	0,00	0,00
<b>Cu</b>	1,91E-04	3,81E-05	4,77E-04
<b>Ag</b>	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	NC	NC	NC
<b>Au</b>	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	0,00	1,12E-04	1,63E-04

Fuente: elaboración propia.

**Tabla LXXVI. Concentración obtenida con relación de agua regia 1:3, en tamaños de tarjeta de 1,0 cm en tres corridas**

<b>Elemento</b>	<b>Concentración del elemento (mg/L)</b>	<b>Concentración del elemento (mg/L)</b>	<b>Concentración del elemento (mg/L)</b>
	<b>Corrida 1</b>	<b>Corrida 2</b>	<b>Corrida 3</b>
<b>Fe</b>	0,00	0,00	0,00
<b>Ni</b>	0,00	0,00	0,00
<b>Cu</b>	1,91E-04	4,84E-04	4,88E-04
<b>Ag</b>	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	NC	NC	NC
<b>Au</b>	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	0,00	1,91E-04	1,53E-04

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXVII. **Concentración obtenida con relación de agua regia 1:3, en tamaños de tarjeta de 1,5 cm en tres corridas**

Elemento	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
<b>Fe</b>	0,00	0,00	5,70E-04
<b>Ni</b>	6,96E-04	0,00	1,74E-03
<b>Cu</b>	1,87E-04	3,05E-05	4,77E-04
<b>Ag</b>	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	NC	NC	NC
<b>Au</b>	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	0,00	1,24E-04	2,68E-03

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXVIII. **Comparación de promedios de corridas de porcentajes masas en tres tamaños y relación 1:3**

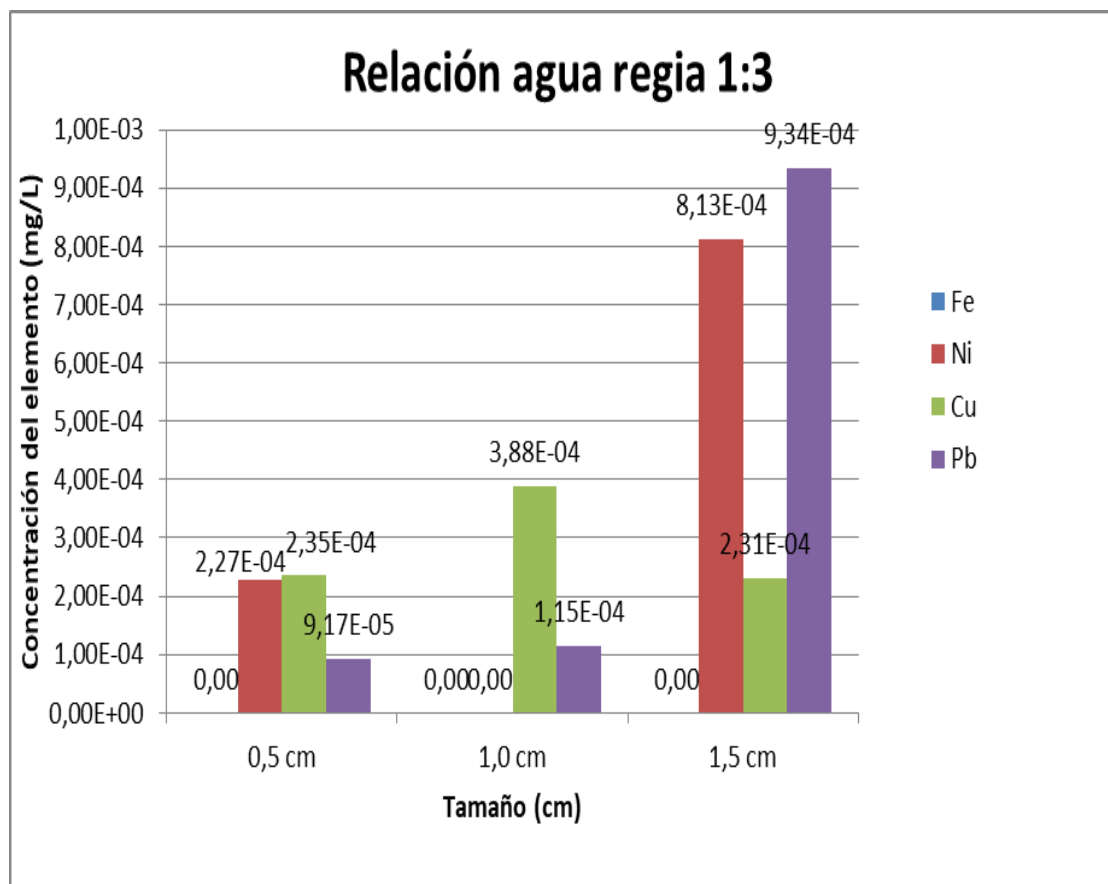
Elemento	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
	0,5 cm	1,0 cm	1,5 cm
<b>Fe</b>	0,00	0,00	0,00
<b>Ni</b>	2,27E-04	0,00	8,13E-04
<b>Cu</b>	2,35E-04	3,88E-04	2,31E-04
<b>Ag</b>	NC	NC	NC

Continuación tabla LXXVIII

<b>Sn</b>	NC	NC	NC
<b>Au</b>	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	9,17E-05	1,15E-04	9,34E-04

Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Comparación de promedios de corridas de porcentajes masas en tres tamaños y relación 1:3**



Fuente: elaboración propia

Tabla LXXIX. **Peso práctico de Cu obtenido con relación de agua regia 3:1, para tres tamaños y tres corridas**

Corrida	Tamaño (cm)	Peso Cu depositado (g)
1	0,5	0,01
2		0,01
3		0
1	1,0	0,02
2		0
3		0,07
1	1,5	0
2		0,6
3		0,08

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXX. **Peso práctico de Cu obtenido con relación de agua regia 2:2, para tres tamaños y tres corridas**

Corrida	Tamaño (cm)	Peso Cu depositado (g)
1	0,5	0,01
2		0,00
3		0,01
1	1,0	0,00
2		0,10
3		0,02

Continuación tabla LXXX

<b>1</b>	<b>1,5</b>	0,04
<b>2</b>		0,03
<b>3</b>		0,01

Fuente: elaboración propia.

**Tabla LXXXI. Peso práctico de Cu obtenido con relación de agua regia 1:3, para tres tamaños y tres corridas**

<b>Corrida</b>	<b>Tamaño (cm)</b>	<b>Peso Cu depositado (g)</b>
<b>1</b>	<b>0,5</b>	0,15
<b>2</b>		0,60
<b>3</b>		0,20
<b>1</b>	<b>1,0</b>	0,10
<b>2</b>		0,31
<b>3</b>		0,00
<b>1</b>	<b>1,5</b>	0,10
<b>2</b>		0,10
<b>3</b>		0,00

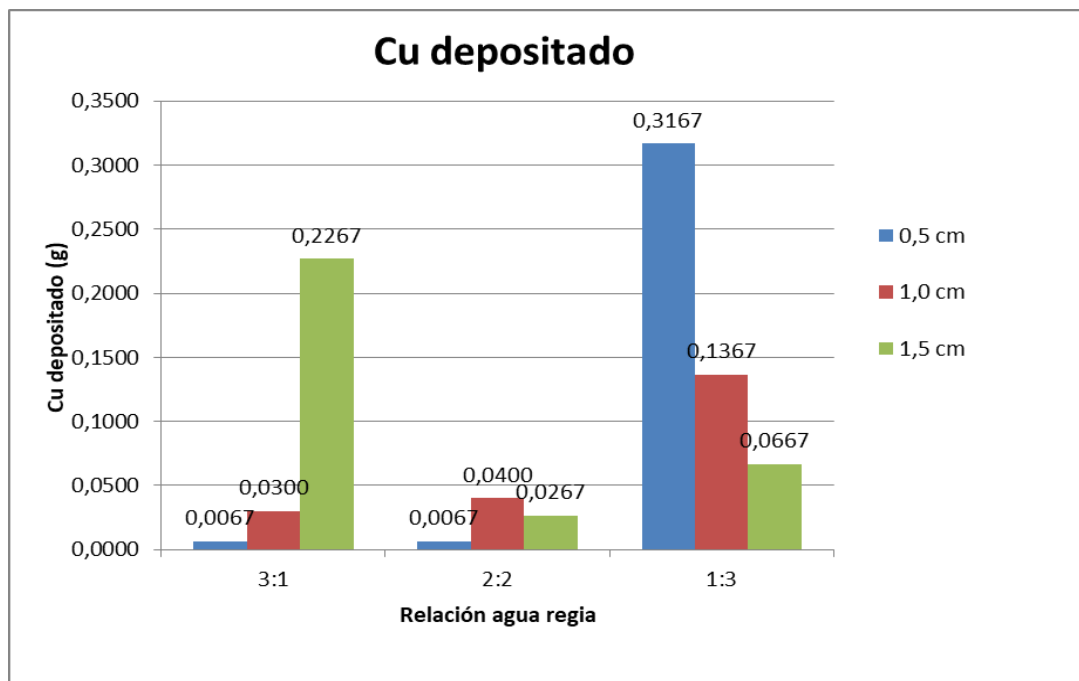
Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXXII. **Comparación de promedios en corridas de peso obtenido en electrodeposición tres relaciones de agua regia**

Tamaño (cm)	Cu depositado (g) 3:1	Cu depositado (g) 2:2	Cu depositado (g) 1:3
0,5	0,0067	0,0067	0,3167
1,0	0,0300	0,0400	0,1367
1,5	0,2267	0,0267	0,0667

Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Comparación de promedios de corridas de peso obtenido en electrodeposición para las tres relaciones de agua regia**



Fuente: elaboración propia.

**Tabla LXXXIII. Peso teórico de Cu obtenido por la ecuación de la Tercera Ley de Faraday**

<b>Tiempo (seg)</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Amperios (A)</b>	<b>Constante de Faraday (A*seg/peso)</b>	<b>Peso molecular del Cu (g/mol)</b>	<b>Estado de valencia del Cu</b>	<b>Peso cobre teórico (g)</b>
3 600	9	0,17	96 500	63,546	2	0,2015

Fuente: elaboración propia.



## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En el presente trabajo de investigación, se realiza la evaluación de extracción de metales (Fe, Ni, Cu, Ag, Sn, Au, Pb) y la obtención de cobre a partir de tarjetas de teléfonos celulares descartados. El desarrollo de este proceso se realizó utilizando un agente lixivante, siendo el agua regia, a tres diferentes relaciones: 3:1, 1:1 y 1:3 de HCl y HNO<sub>3</sub> respectivamente, con tres tamaños de partículas diferentes: 0,5 cm, 1,0 cm y 1,5 cm con el fin de determinar a qué relación de agua regia y tamaño de partícula se obtuvieran mejores resultados. Para cada relación y tamaño se realizan tres corridas para obtener un resultado más representativo.

Se procedió a desarmar los teléfonos celulares con el fin de obtener la tarjeta y con la ayuda de un horno mufla se logró remover el plástico que cubre a los metales que tiene la tarjeta. Para lograr obtener un mejor rendimiento se realizaron pruebas de temperatura en el horno mufla y así determinar a qué temperatura los metales de la tarjeta no sufrían daños; en la tabla X de la sección de Recolección y ordenamiento de la información y los anexos 14 a 16 se muestra que a temperaturas elevadas la tarjeta se carbonizaba completamente teniendo un resultado insatisfactorio pues los metales sufrían daños en sus propiedades, la temperatura adecuada para remover el plástico fue de 500 °C, al finalizar la remoción a esta temperatura, no se notó cambio de color en la tarjeta indicando que únicamente se realizó la remoción y no se dañaron los metales.

Se procedió a disminuir el tamaño de la tarjeta de forma manual con la ayuda de unas tijeras especiales para cortar metal, en el apéndice 6 se muestra los tres tamaños de partícula que se utilizaron.

De los tres tamaños de tarjeta, se tomaron 15 gramos de cada uno y se sometieron a contacto directo con agua regia en beaker separados; colocando la solución lixivante con las partículas en una plancha agitadora a temperatura controlada hasta llegar a sequedad, después de 4 días se procedió a neutralizar la tarjeta lixiviada con una solución de NaOH 1M. La solución neutralizada se filtró quedando en el papel filtro, lodos de la lixiviación que contenían metales que se desprendieron de las partículas de la tarjeta y en el beaker la solución neutralizada.

Los metales retenidos en el papel filtro se sometieron a un proceso de secado en un horno de convección forzada a 80 °C por 45 minutos, al perder toda la humedad se procedió a pulverizar la muestra con la ayuda de un mortero y pistilo; teniendo una textura fina se analizó en el espectrofotómetro de fluorescencia de rayos X.

Por cada muestra introducida en el espectrofotómetro de fluorescencia de rayos X, se obtuvieron 3 valores de porcentaje de masa por cada metal, que corresponden a las corridas realizadas en el equipo. En las tablas de la LI a la LIII se observan las tres corridas por cada tamaño mostrando el efecto de la relación de agua regia 3:1 y tamaños de partícula sobre el porcentaje masa obtenido para cada metal; y en la tabla LIV y figura 13 se encuentra el promedio de las corridas, en donde se puede observar que el elemento con mayor porcentaje masa obtenido fue el Cu en los tres tamaños de tarjeta, seguido del Sn, Ni, Pb, en el caso del Au y Ag se observa un mayor rendimiento para el tamaño 0,5 cm disminuyendo notablemente en los tamaños 1,0 cm y 1,5 cm, en

los porcentajes masa de Fe se observan valores variables en cada tamaño; obteniendo mejor resultado con 1,0 cm.

En las tablas LV a LVII se encuentran las tres corridas por cada tamaño realizadas con la relación de agua regia 2:2 , mostrando el efecto de la relación de agua regia con los tamaños de partícula analizados sobre el porcentaje masa de cada metal, mostrando en la tabla LVIII y figura 14 el valor promedio de las corridas y el respectivo porcentaje masa de los metales para cada tamaño, el metal más favorecido en esta relación de agua regia fue el Cu, seguido del Sn, Ni, Pb, la Ag muestra porcentaje aceptable en el tamaño 0.5 cm; disminuyendo notablemente en los otros dos tamaños, el Au obtuvo rendimientos similares en tamaños 1,0 y 1,5 cm; siendo menor resultado para 0.5 cm. Se puede notar que para el Fe no favoreció esta relación, pues no se obtuvo rendimiento. En las tablas de la LIX a LXI se puede notar tres corridas por cada tamaño y el efecto de la relación de agua regia 1:3 sobre el porcentaje masa obtenido para cada metal; en la tabla LXII y figura 15 se observa el promedio de las corridas por cada tamaño de partícula, el elemento con mayor porcentaje masa obtenido fue el Cu, le sigue el Sn, a diferencia de las otras dos relaciones el tercer elemento con mayor porcentaje masa es el Pb, seguida del Au, la Ag y observando que para el Ni y Fe en el tamaño 1,0 cm en ambos no se detectó este metal.

En la figuras 16 a 22, se muestra la representación gráfica del porcentaje masa de cada elemento, comparando en la misma gráfica las tres relaciones de agua regia y los tres tamaños.

En la figura 16 se muestra al Fe, notándose que el tamaño 1,0 cm y la relación 3:1 muestra mayores resultados; se aprecia en la relación 2:2 para los tres tamaños que el equipo de fluorescencia no detecto Fe en las tarjetas,

siendo este elemento el que se encuentra en menor cantidad. En la figura 17 se observa que el Ni con tamaño 1,5 cm y relación 2:2 muestra mayor rendimiento; aunque para la relación 3:1 se muestran valores con diferencias no significativas en los tres tamaños, considerando que en la relación 3:1 se obtiene mayor cantidad de Ni que en las otras relaciones. La figura 18 muestra al Cu, haciéndose evidente que es el elemento con mayor rendimiento en las tres relaciones y los tres tamaños; con lo que se puede concluir que es el que se encuentra en mayor cantidad en las tarjetas, tuvo mayor porcentaje recuperado para la relación 2:2 y tamaño 1.0 cm aunque para los tamaño 0,5 cm los porcentajes tienen menos desviaciones.

La Ag se muestrea en la figura 19, mostrando una pronunciada barra en la relación 2:2 y tamaño 0,5 cm; aunque en este tamaño las tres relaciones muestran variaciones significativas, resultando la relación 3:1 la ideal para la recuperación de plata por ser la relación con porcentajes más estables. La figura 20 muestra que el Sn en la relación 1:3 y tamaño 1,0 cm obtuvo mayor porcentaje masa recuperada pero, las relaciones 3:1 y 2:2 se mantuvieron casi constante en los tres tamaños. El Au representado en la figura 21, obtuvo resultados satisfactorios para el tamaño 1,5 cm y relación 1:3 y aunque en la gráfica se observe que para los tres tamaños y tres relaciones hay diferencias significativas entre los valores; la relación y tamaño que presentan mayores resultados son 2:2 y 0.5 cm respectivamente. En la figura 22 se observa el Pb con mayor porcentaje masa en la relación 1:3 y tamaño 1,5 cm pero mostrando valores dispersos de porcentaje en relación para ese tamaño; se presentan mayores resultados para la relación 2:2 y tamaño 1,0 cm.

Al tener los resultados de las muestras se procedió a realizar la selección del tamaño y relación de agua regia adecuado para la obtención de los siete metales analizados, se determina que la relación 3:1 y tamaño 0,5 cm son las

condiciones en donde se obtienen mejores resultados para Fe, Ni, Cu, Ag y Sn; los porcentajes de metales fueron: 0,1030 % Fe, 0,5927 % Ni, 70,6667 % Cu, 0,0948 % Ag y 3,8433 % Sn. En el trabajo que se desarrolló, se observó que el mayor porcentaje de recuperación de metal fue el Cu y el de menor porcentaje el Fe. Estos porcentajes de masa obtenidos se deben a que en la relación de agua regia 3:1, el HCl se encuentra en mayor proporción; este ácido con un pKa de -6,3 es más fuerte que el HNO<sub>3</sub> con pKa de -1,64 por lo tanto logró desprender mayor masa de metales que en las relaciones en donde el HNO<sub>3</sub> predominaba.

La relación 2:2 es un agente lixivante que tiene mayores resultados de lixiviación para elementos como Au y Pb.

El tamaño con mejores resultados fue de 0,5\*0,5 cm, siendo este tamaño el más pequeño de los tres que se analizaron, se sabe que a menor tamaño mayor es el área de contacto. En el caso del Pb el tamaño 1,0\*1,0 cm da resultados mayores.

Inicialmente se tomarían 70 gramos de tarjeta para analizarlos con dos agentes lixiviantes: HCl y agua regia, el procedimiento con HCl resultó un proceso más lento, notándose que el desprendimiento de metales se realizaba en un tiempo mayor y los resultados de porcentaje de masa obtenidos no eran significativos por tener valores más bajos si se compara con el lixivante de agua regia, este dato puede observarse en el apéndice 2 y 3. Por cuestiones de ahorro de material y al constatarse que con agua regia se obtienen mejores resultados se tomó la decisión de tomar 15 gramos de tarjeta y como agente lixivante agua regia a tres diferentes relaciones.

Las tablas LXIII a LXVI y las figuras 23 a 26 representan las curvas de calibraciones del Fe, Pb, Cu y Ni respectivamente, dichas tablas y gráficas fueron necesarias para determinar la concentración en mg/L de los elementos, estas curvas fueron realizadas por estándares internos en el espectrofotómetro de fluorescencia de rayos X.

Las tablas LXVII a LXIX muestran la relación 3:1 con tres corridas por tamaño en relación a la concentración de cada elemento, para los elementos Fe, Ni, Cu y Pb se observan valores de concentraciones; mientras que para los elementos Ag, Sn y Au no pudieron cuantificarse por la falta de estándar interno en el laboratorio. En la tabla LXX y figura 27 se observa el promedio de las corridas por cada tamaño de partícula, demostrando que para el Cu a 0,5 cm se obtiene mejor concentración, le sigue el Ni y el Fe y Pb muestran concentraciones variadas, el tamaño que presentó mayores concentraciones fue 1,0 cm.

En las tablas LXXI a LXXIII se muestra la relación 2:2 con tres corridas por tamaño indicando las concentraciones de los elementos; la tabla LXXIV y figura 28 muestran el promedio de las corridas en cada tamaño, puede observarse en el tamaño 0,5 cm una tendencia de valores similares, demostrando que este tamaño es el adecuado para la determinación de las concentraciones de los elementos, el elemento que obtuvo mayor concentración fue el Pb en un tamaño de 1,0 cm, seguido del Ni con valores similares en los tres tamaños; lo que demuestra que este elemento puede ser rescatable a esta relación de agua regia, como se observó en la tabla LVIII; la relación 2:2 no disuelve el Fe de las tarjetas. Se puede notar que esta relación es la que mejor resultados obtuvo debido a que sus concentraciones no se encuentran dispersas entre los tamaños y metales. En las tablas LXXV a LXXVII se muestra la relación 1:3 en sus tres corridas por cada tamaño para las concentraciones; en la tabla LXXVIII

y figura 29 se muestra el promedio de corridas de las concentraciones por cada tamaño, demostrando que para esta relación el tamaño indicado es de 0,5 cm por mostrar valores similares entre sí; aunque se obtuvieron mayores concentraciones para el Pb y Ni en el tamaño 1,5 cm.

Se puede observar en las tablas LI a la LXXVIII que el Fe es el elemento con cantidades menores de porcentaje masa y de concentración en comparación con los otros seis metales, debido a que el Fe se encuentra en pequeñas cantidades en las tarjetas; por lo que al analizar las muestras en el espectrofotómetro de fluorescencia de rayos X no detecta este metal, caso contrario; el Cu es el elemento más rico en las tarjetas, este elemento ocupa el 50 % de la tarjeta y es por ello que fue el elemento que más se notó en cada tamaño y cada relación de agua regia.

Para iniciar el proceso de electrodeposición se montó un sistema como se muestra en el anexo 9, como cátodo se utilizó una llave (estas están compuestas de diversos metales, pero principalmente de Zinc) que se conectó al polo negativo de la batería y como ánodo se utilizó cable de cobre conectado al polo positivo de la batería. La prueba se realizó durante sesenta minutos y la fuente de poder utilizada fue una batería de nueve voltios y 170 miliamperios por hora, marca GP (ver apéndice 8). La llave fue previamente lijada para eliminar impurezas y lograr una mayor retención de Cu.

Una vez conectado el alambre de Cu a la batería se procedió a conectar la llave, al sumergirla en la solución lixiviada se notó un burbujeo sobre la llave, lo que significó que estaba iniciando el proceso. (Ver anexo 10). Transcurridos unos minutos la solución empezó a tornarse color marrón y en la llave se depositó un lodo del mismo color; esto sucedió porque al momento de que la batería pasara corriente a través de los electrodos, el alambre de Cu cedió sus

electrones y los iones metálicos que estaban en la solución lixiviada se redujeron y se depositaron sobre la llave.

En las tablas LXXIX a LXXXI se observa el peso en gramos del cobre depositado en la llave para cada relación de agua regia en los tres tamaños y tres corridas, en la tabla LXXXII y figura 30 se muestra el promedio de las corridas para cada tamaño en sus relaciones de agua regia, mostrando que para la relación 1:3 se obtuvieron mejores resultados.

Según la Tercera ley de Faraday, la relación entre la intensidad de la fuente de poder (0,17A), el tiempo de la electrodeposición (3 600 s), el peso molecular del elemento a recuperar (63,54 g); con el estado de valencia del Cu (2) y la constante de Faraday (96 500), da un valor teórico de lo que debe recuperarse de Cu en las condiciones indicadas, en la Tabla LXXXIII se observa el valor teórico de Cu que debió haber sido recuperado (0,2015 g) este valor se toma como referencia y se compara con los resultados de la tabla LXXXII, mostrando que los valores que más se asemejan al dato teórico; son los de la relación 1:3, específicamente para la partícula de 1,0 cm, obteniendo un valor de 0,1367 g de Cu depositado en la llave.

Al comparar los resultados de las relaciones de agua regia para cada tamaño de partícula por medio del análisis de varianza se comprueba la hipótesis nula para todos los elementos, que dice que no existe una variación significativa en la recuperación de cada metal ni en la obtención de cobre en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjeta. A excepción del Cu que comprueba la hipótesis alternativa para la relación de agua regia que dice que existe una variación significativa en la recuperación de Cu en las tres diferentes relaciones de agua regia (Ver apéndice 5).



Se realizó una prueba de lixiviación extra; utilizando como agente lixivante vinagre con peróxido de hidrógeno, los resultados no fueron satisfactorios, pues el porcentaje masa obtenido fue menor que en las dos pruebas anteriores y el tiempo de contacto directo entre la tarjeta y el vinagre superó los quince días. El resultado de la electrodeposición fue un valor mucho mayor que el esperado según la teoría, pues la llave quedó cubierta con exceso de lodo, este lodo contenía más elementos del que se esperaba. Los resultados pueden observarse en el apéndice 4, la foto de la llave y la solución al final de la electrodeposición puede encontrarse en el anexo 12 y 13.



## CONCLUSIONES

1. Se determinó que el agua regia es el agente con mayor poder de lixiviación para los metales, se consigue extraer mayores cantidades de metales en las tarjetas y disuelve los metales preciosos y básicos de los residuos electrónicos, además se pueden encontrar pequeñas cantidades de metales preciosos (oro y plata). El HCl como agente lixivante da resultados de porcentaje masa bajos.
2. La relación de agua regia 3:1 presenta mayor recuperación de porcentajes masa para los metales hierro, níquel, cobre, plata y estaño, diferencia del el oro y plomo se obtienen mejores resultados en la relación de agua regia 2:2 y en los tamaños 0,5 y 1,0 cm respectivamente.
3. El elemento de menor porcentaje masa encontrado por Fluorescencia de rayos X fue el hierro y se evidenció que el cobre es el elemento con mayor porcentaje de incidencia en las tarjetas de teléfonos celulares.
4. La técnica de electrodeposición es satisfactoria para la recuperación de cobre, se demostró que la relación agua regia 1:3 y tamaño 0,5 cm presentaron mayor peso en recuperación de cobre.
5. 0,5 cm es el tamaño de partícula óptimo que presenta mayores porcentajes masa para los metales como hierro, níquel, cobre, plata, oro y estaño.



## RECOMENDACIONES

1. Realizar campañas universitarias para recolectar teléfonos celulares que llegaron al final de su vida útil, que estos sean entregados a instituciones que se dediquen al reciclaje de aparatos electrónicos y así evitar la acumulación de desechos electrónicos y fomentar la minería urbana.
2. Utilizar otro método para la carbonización de las tarjetas de los celulares, pues carbonizando las tarjetas en el horno mufla se generan gases producidos por la quema del plástico y al estar el horno en el laboratorio (un lugar cerrado y con poca ventilación), los gases se concentran dentro de este; pero si se utiliza por ejemplo un soplete de gas propano y se trabaja con suficiente ventilación no habría problema.
3. Utilizar una sola marca de teléfonos celulares para que los resultados sean más precisos y tomar únicamente las partes en donde se muestre mayor concentración de metales de las tarjetas para obtener un resultado mayor en porcentaje masa recuperada.
4. Utilizar baterías recargables para evitar caer en gastos mayores y trabajar con baterías de voltaje y amperaje alto para obtener mayores resultados de recuperación de cobre.
5. Lijar la llave antes del proceso electrodeposición para eliminar impurezas y que la recuperación de cobre sea mayor.



## BIBLIOGRAFÍA

1. BORJA, G.S. *Componentes reciclables en un teléfono móvil*. 2012. [En línea]. <<http://plantandoideascrecensoluciones.blogspot.com/2012/04/definicion-el-telefono-moviles-un.html>> [Consulta: agosto de 2017].
2. CALDERÓN, J., Trejo, A., Acebo, J. *Metales preciosos en residuos electrónicos para su refinación en Ecuador*. 2003. 8-10 p.
3. CAMPOS LÓPEZ, C. A. *Basura Electrónica*. 2011 [En línea]. <<http://desechoselectronicos2011.blogspot.com/2011/03/definicion-de-basura-electronica.html>> [Consulta: agosto de 2017].
4. CUI, J. y Zhang, L. *Metallurgical recovery of metals from electronic waste*. 2008. Editorial: Elsevier Journal of Hazardous Materials, 231-250 p.
5. E-BASURA. *Reutilización tecnológica y concientización ambiental*. 2016. [En línea] <<https://e-basura.unlp.edu.ar/2016>> [Consulta: agosto de 2017].
6. E-WASTE DE GUATEMALA. *Desechos electrónicos*. 2013. [En línea]. <<http://www.ewastedeguatemala.org/index.php>> [Consulta: agosto de 2017].

7. EL PAÍS. *Basura electrónica*. 2017 [En línea]. <<http://www.elpais.com.uy/economia-y-mercado/basura-electronica-crecera-mundo.html>> [Consulta: septiembre de 2017].
8. ELECTRÓNICA. *Circuitos electrónicos e información técnica*. 2011. [En línea]. <<http://www.electronica2000.com/temas/cirimp.htm>> [Consulta: agosto de 2017].
9. EL PERIÓDICO. *Operadoras reportan 2,8 millones de líneas móviles*. 2020. [En línea]. <<https://elperiodico.com.gt/inversion/2019/10/03/operadoras-reportan-20-8-millones-de-lineas-moviles/>> [Consulta: enero de 2020].
10. ELEMENTOS. *Elementos*. 2020 [En línea]. <<http://elementos.org.es/plata>> [consulta, agosto de 2017].
11. ESPINOZA ECHEVERRÍA, Vicente Sebastián. *Recuperación de metales de las tarjetas de circuito de celulares descartados*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustrial. XXIII-XXVI 15 p.
12. GREENPEACE. *El lado tóxico de la telefonía móvil*. 2012. Campaña Basura Electrónica, 3-12 p.
13. GUATEVISIÓN. *Venta de operaciones de Telefónica de Guatemala*. 2019. [En línea]. <<https://www.guatevision.com/noticias/nacional/economia-que->



pasara-tras-la-venta-de-operaciones-de-telefonica-guatemala>  
[Consulta: enero 2020].

14. HEUREMA. *Complejos de cobre*. 2006. [En línea]. <<http://www.heurema.com/QG21.htm>> [Consulta: octubre de 2017].
15. LA REPUBLICA. *País produce alta cantidad de basura electrónica*. 2019. [En línea]. <[https://www.larepublica.net/noticia/pais\\_produce\\_alta\\_cantidad\\_de\\_basura\\_electronica](https://www.larepublica.net/noticia/pais_produce_alta_cantidad_de_basura_electronica)> [Consulta: enero de 2020].
16. MINISTERIO DE AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES. *Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos*. 2015. [En línea]. <<http://www.marn.gob.gt/Multimedios/1995.pdf>> [Consulta: enero de 2020].
17. MUNICIPALIDAD DE GUATEMALA. *Centro de atención ambiental*. 2016 [En línea]. <<http://www.muniguate.info/post/151979048096/dos-centros-m%C3%A1s-de-acopio-de-desechos>> [Consulta: enero 2020].
18. NOTICIAS ONU. *Los desechos electrónicos, una oportunidad de oro para el trabajo decente*. 2019. [En línea]. <<https://news.un.org/es/story/2019/04/1455621>> [Consulta: enero 2020].
19. OLIVERA PONCE, José Manuel. *Optimización del proceso de reciclado de tarjetas de circuitos impresos –PCB-*. Trabajo de graduación de

Ing. Industrial, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Oaxaca, México. 2013 10-18p.

20. OMPI, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL. *Los desechos electrónicos y la innovación: aprovechar su valor oculto.* 2014 [En línea]. <[https://www.wipo.int/wipo\\_magazine/es/2014/03/article\\_0001.html](https://www.wipo.int/wipo_magazine/es/2014/03/article_0001.html)> [Consulta: enero de 2019].
21. PRENSA LIBRE. *Celulares.* 2017 [En línea]. <<http://www.prensalibre.com/guatemala/comunitario/van-779-mil-celulares-robados>> [Consulta: agosto de 2017].
22. \_\_\_\_\_. *Revolución de los Smartphones.* 2014. [En línea]. <[http://www.prensalibre.com/tecnologia/Tecnologia-revolucion-en-smartphones-banda-4G\\_0\\_1245475441.html](http://www.prensalibre.com/tecnologia/Tecnologia-revolucion-en-smartphones-banda-4G_0_1245475441.html)> [Consulta: agosto de 2017].
23. RECELCA. *Reciclajes Electrónicos Centroamericanos, S.A.* 2013. [En línea]. <<http://www.recelca.com/?PAGE=3&PANELID=3>> [Consulta: enero 2020].
24. RECK, K.B. y Graedel, T.E. *Challenges in Metal Recycling.* 2012 Editorial: Science AAAS. New York, Estados Unidos, 690-693 p.
25. RIGAKU. *Manual Espectrofotómetro de Fluorescencia de Rayos X – Analizador elemental EDXRF a bajo costo-* 2012. 2-10 p.

26. SAN MIGUEL, Pablo Alcalde. *Electrónica*. 2014 Editorial: Lorenti, Segunda Edición, 190 p.
27. SELMET GUATEMALA. *Basura electrónica*. 2011. [En línea]. <<http://www.selmetguatemala.com/>> [Consulta: enero 2020].
28. SOY 502 GUATEMALA. *Guatemala, un país con más celulares que habitantes*. 2015 [En línea]. <<http://www.selmetguatemala.com/>> [Consultado: agosto de 2017].
29. STATISTA. *Número de usuarios de teléfonos inteligentes a nivel mundial desde 2014 hasta 2019(en millones)*. 2020. [En línea]. <<https://es.statista.com/estadisticas/636569/usuarios-de-telefonos-inteligentes-a-nivel-mundial--2019/>> [Consulta: enero 2020].
30. SUPERINTENDENCIA DE TELECOMUNICACIONES. *Boletín Estadístico, primer semestre*. 2020. 28-29 p.
31. TELEFÓNICA GUATEMALA. *Recuperación de oro en residuos electrónicos mediante bacterias cianógenos*. 2017 [En línea] <<https://biotecnologia.fundaciontelefonica.com/2017/02/07/recuperacion-de-oro-en-residuos-electronicos-mediante-bacterias-cianogenicas/>> [Consultado: agosto de 2017].
32. TRADUSA METAL FINISH. *Electrodeposición de metales*. 2010 [En línea] <<http://cromadostradusa.es/la-electrodeposicion-de-metales-el-proceso-y-sus-parametros/>> [Consultado: octubre de 2017].

33. UNEP. *Fluorescencia de rayos X*. 2005. [En línea] <[http://www.usc.es/export9/sites/webinstitucional/gl/investigacion/riaidt/raiosx/descargas/UNED\\_Curso\\_Fluorescencia.pdf](http://www.usc.es/export9/sites/webinstitucional/gl/investigacion/riaidt/raiosx/descargas/UNED_Curso_Fluorescencia.pdf)> [Consultado: septiembre de 2017].
  
34. UNITED NATIONS UNIVERSITY. *Solving the E-waste Problem (StEP)*. 2014. [En línea]. <<https://unu.edu/projects/solving-the-e-waste-problem-step-initiative.html#outline>> [Consultado: agosto de 2017].

## APÉNDICE

Apéndice 1.

### Tabla de requisitos académicos



Fuente: Elaboración propia

Apéndice 2. **Porcentaje de masa para agente lixiviante HCl al 37 %**

Porcentaje de masa obtenido con HCl 37 %, en tamaños de tarjeta de 0,5 cm  
en tres corridas

<b>Elemento</b>	<b>% masa corrida 1</b>	<b>% masa corrida 2</b>	<b>% masa corrida 3</b>
<b>Fe</b>	0,349	0,104	0,063
<b>Ni</b>	0,005	0,009	0,006
<b>Cu</b>	13,414	13,429	13,529
<b>Ag</b>	0,000	0,000	0,000
<b>Sn</b>	0,000	0,000	0,000
<b>Au</b>	0,231	0,136	0,099
<b>Pb</b>	0,343	0,540	0,573

Fuente: Elaboración propia

Porcentaje de masa obtenido con HCl 37 %, en tamaños de tarjeta de 1,0 cm  
en tres corridas

<b>Elemento</b>	<b>% masa corrida 1</b>	<b>% masa corrida 2</b>	<b>% masa corrida 3</b>
<b>Fe</b>	0,297	0,307	0,313
<b>Ni</b>	0,056	0,028	0,076
<b>Cu</b>	13,257	13,329	13,157
<b>Ag</b>	0,000	0,000	0,000
<b>Sn</b>	0,000	0,000	0,000
<b>Au</b>	0,002	0,177	0,038
<b>Pb</b>	0,529	0,314	0,581

Fuente: Elaboración propia

Porcentaje de masa obtenido con HCl 37 %, en tamaños de tarjeta de 1,5 cm  
en tres corridas

Elemento	% masa corrida 1	% masa corrida 2	% masa corrida 3
<b>Fe</b>	0,170	0,346	0,263
<b>Ni</b>	0,083	0,120	0,041
<b>Cu</b>	12,771	11,257	11,900
<b>Ag</b>	0,000	0,000	0,000
<b>Sn</b>	0,000	0,000	0,000
<b>Au</b>	0,066	0,277	0,214
<b>Pb</b>	1,174	2,271	1,857

Fuente: Elaboración propia

Promedio de corridas de porcentaje masa obtenido con HCl 37 %, en los tres  
tamaños de tarjeta

Elemento	0,5 cm	1,0 cm	1,5 cm
	% masa	% masa	% masa
<b>Fe</b>	0,133	0,306	0,260
<b>Ni</b>	0,007	0,053	0,081
<b>Cu</b>	13,457	13,248	11,976
<b>Ag</b>	0,000	0,000	0,000
<b>Sn</b>	0,000	0,000	0,000
<b>Au</b>	0,155	0,072	0,186
<b>Pb</b>	0,485	0,475	1,768

Fuente: Elaboración propia

Apéndice 3. **Concentración de elementos para agente lixiviante  
HCl al 37 %**

Concentración obtenida con HCl 37%, en tamaños de tarjeta de 0,5 cm en tres corridas

Elemento	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
<b>Fe</b>	8,36E-05	8,36E-05	7,99E-05
<b>Ni</b>	1,00E-04	7,73E-05	9,27E-05
<b>Cu</b>	1,63E-05	6,21E-05	5,72E-05
<b>Pb</b>	1,43E-04	5,58E-04	5,43E-04

Fuente: Elaboración propia

Concentración obtenida con HCl 37 %, en tamaños de tarjeta de 1,0 cm en tres corridas

Elemento	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
<b>Fe</b>	7,63E-05	7,63E-05	7,27E-05
<b>Ni</b>	1,78E-04	1,85E-04	1,93E-04
<b>Cu</b>	5,72E-05	5,72E-05	5,72E-05
<b>Pb</b>	4,46E-04	3,74E-04	4,97E-04

Fuente: Elaboración propia



Concentración obtenida con HCl 37 %, en tamaños de tarjeta de 0,5 cm en tres corridas

Elemento	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
<b>Fe</b>	6,54E-05	8,72E-05	7,99E-05
<b>Ni</b>	1,47E-04	1,70E-04	1,70E-04
<b>Cu</b>	4,90E-05	5,72E-05	4,90E-05
<b>Ag</b>	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	NC	NC	NC
<b>Au</b>	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	5,07E-04	6,97E-04	6,30E-04

Fuente: Elaboración propia

Comparación de concentración obtenida con HCl 37 %, en los tres tamaños de tarjeta y tres corridas

Elemento	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
	0,5 cm	1,0 cm	1,5 cm
<b>Fe</b>	8,24E-05	7,51E-05	7,75E-05
<b>Ni</b>	9,02E-05	1,85E-04	1,62E-04
<b>Cu</b>	4,52E-05	5,72E-05	5,18E-05
<b>Ag</b>	NC	NC	NC
<b>Sn</b>	NC	NC	NC
<b>Au</b>	NC	NC	NC
<b>Pb</b>	4,15E-04	4,39E-04	6,11E-04

Fuente: Elaboración propia

Apéndice 4. **Porcentaje de masa para agente lixiviante Vinagre**

Porcentaje de masa obtenido con Vinagre, en tamaños de tarjeta de 1,5 cm

Elemento	% masa
Fe	0,000
Ni	0,075
Cu	26,400
Ag	33,333
Sn	0,000
Au	0,196
Pb	0,000

Fuente: Elaboración propia

Concentración para cada elemento obtenida con Vinagre, en tamaño de tarjeta de 1,5 cm

Corrida		Única			
Tamaño Tarjeta (cm)		1,5			
Elemento	Intensidad elemento (cps/ $\mu$ A)	Intensidad Estandar (cps/ $\mu$ A)	Contante de Sensibilidad	Concentración Estándar (mg/L)	Concentración del elemento (mg/L)
Fe	0,00	117,935	1	2	0,00
Ni	0,0398	55,46	1	2	1,44E-03
Cu	0,0013	52,426	1	2	4,96E-05
Ag	0,0091	NC	NC	NC	NC
Sn	0,00	NC	NC	NC	NC
Au	0,0092	NC	NC	NC	NC
Pb	0,00	83,643	1	2	0,00

Fuente: Elaboración propia

## Apéndice 5. **Análisis de error**

Empleando un análisis de varianzas de un factor con un nivel de significancia de 0,05 se buscó probar las siguientes hipótesis:

H<sub>0,1</sub>: No existe una variación significativa en la recuperación de Fe en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

H<sub>0,2</sub>: No existe una variación significativa en la recuperación de Ni en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

H<sub>0,3</sub>: No existe una variación significativa en la recuperación de Cu en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

H<sub>0,4</sub>: No existe una variación significativa en la recuperación de Ag en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

H<sub>0,5</sub>: No existe una variación significativa en la recuperación de Sn en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

H<sub>0,6</sub>: No existe una variación significativa en la recuperación de Au en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

H<sub>0,7</sub>: No existe una variación significativa en la recuperación de Pb en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

H<sub>0,8</sub>: No existe una variación significativa en la obtención de cobre por medio de electrodeposición en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

H<sub>1,1</sub>: Existe una variación significativa en la recuperación de Fe en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

- H<sub>1,2</sub>: Existe una variación significativa en la recuperación de Ni en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.
- H<sub>1,3</sub>: Existe una variación significativa en la recuperación de Cu en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.
- H<sub>1,4</sub>: Existe una variación significativa en la recuperación de Ag en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.
- H<sub>1,5</sub>: Existe una variación significativa en la recuperación de Sn en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.
- H<sub>1,6</sub>: Existe una variación significativa en la recuperación de Au en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.
- H<sub>1,7</sub>: Existe una variación significativa en la recuperación de Pb en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.
- H<sub>1,8</sub>: Existe una variación significativa en la obtención de Cu por medio de electrodeposición en las tres diferentes relaciones de agua regia y los tres tamaños de tarjetas.

Análisis de varianza para el Fe, en tamaño y relación de agua regia

Tamaño (cm)	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
0,5	3	0,1030	0,0343	0,0035		
1,0	3	0,3900	0,1300	0,0507		
1,5	3	0,0900	0,0300	0,0027		
Relación agua regia	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
3:1	3	0,4930	0,1643	0,0408		
2:2	3	0,0000	0,0000	0,0000		
1:3	3	0,0900	0,0300	0,0027		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Tamaño	0,0192	2	0,0096	0,5645	0,6082	6,9443
Relación agua regia	0,0460	2	0,0230	1,3531	0,3558	6,9443
Error	0,0679	4	0,0170			
Total	0,1330	8				
F<FC	se acepta la hipótesis nula para los tres tamaños de tarjeta					
F<FC	se acepta la hipótesis nula para la relación con agua regia					

Fuente: Elaboración propia

Análisis de varianza para el Ni, en tamaño y relación de agua regia

Tamaño (cm)	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
0,5	3	1,1467	0,3822	0,0673		
1,0	3	1,2114	0,4038	0,1223		
1,5	3	1,6627	0,5542	0,0303		
Relación agua regia	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
3:1	3	1,6430	0,5477	0,0071		
2:2	3	1,8284	0,6095	0,0216		
1:3	3	0,5493	0,1831	0,0584		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Tamaño	0,0527	2	0,0263	0,8672	0,4866	6,9443
Relación agua regia	0,3185	2	0,1593	5,2440	0,0762	6,9443
Error	0,1215	4	0,0304			
Total	0,4927	8				
F<FC	se acepta la hipótesis nula para los tres tamaños de tarjeta					
F<FC	se acepta la hipótesis nula para la relación con agua regia					

Fuente: Elaboración propia

Análisis de varianza para el Cu, en tamaño y relación de agua regia

Tamaño (cm)	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
0,5	3	120,5013	40,1671	700,1483		
1,0	3	99,4671	33,1557	890,7366		
1,5	3	114,8971	38,2990	425,1247		
Relación agua regia	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
3:1	3	199,6000	66,5333	19,9244		
2:2	3	67,5220	22,5073	99,0652		
1:3	3	67,7436	22,5812	1,5285		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Tamaño	79,1029	2	39,5514	0,9770	0,4513	6,9443
Relación agua regia	3870,0858	2	1935,0429	47,7985	0,0016	6,9443
Error	161,9333	4	40,4833			
Total	4111,1220	8				
F<FC	se acepta la hipótesis nula para los tres tamaños de tarjeta					
F>FC	se rechaza la hipótesis nula para la relación con agua regia					

Fuente: Elaboración propia

Análisis de varianza para la Ag, en tamaño y relación de agua regia

Tamaño (cm)	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
0,5	3	0,5189	0,1730	0,0246		
1,0	3	0,2479	0,0826	0,0004		
1,5	3	0,1690	0,0563	0,0002		
Relación agua regia	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
3:1	3	0,2263	0,0754	0,0003		
2:2	3	0,4930	0,1643	0,0269		
1:3	3	0,2165	0,0722	0,0010		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Tamaño	0,0225	2	0,0112	1,3213	0,3626	6,9443
Relación agua regia	0,0164	2	0,0082	0,9659	0,4547	6,9443
Error	0,0340	4	0,0085			
Total	0,0729	8				
F<FC	se acepta la hipótesis nula para los tres tamaños de tarjeta					
F<FC	se acepta la hipótesis nula para la relación con agua regia					

Fuente: Elaboración propia

Análisis de varianza para el Sn, en tamaño y relación de agua regia

Tamaño (cm)	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
0,5	3	11,3133	3,7711	0,1874		
1,0	3	11,4237	3,8079	1,4763		
1,5	3	9,4800	3,1600	0,1580		
Relación agua regia	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
3:1	3	10,3237	3,4412	0,2413		
2:2	3	9,4500	3,1500	0,0922		
1:3	3	12,4433	4,1478	1,0957		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Tamaño	0,7946	2	0,3973	0,7700	0,5213	6,9443
Relación agua regia	1,5796	2	0,7898	1,5307	0,3209	6,9443
Error	2,0639	4	0,5160			
Total	4,4381	8				
F<FC	se acepta la hipótesis nula para los tres tamaños de tarjeta					
F<FC	se acepta la hipótesis nula para la relación con agua regia					

Fuente: Elaboración propia

Análisis de varianza para el Au, en tamaño y relación de agua regia

Tamaño (cm)	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
0,5	3	0,4317	0,1439	0,0032		
1,0	3	0,3077	0,1026	0,0070		
1,5	3	0,4942	0,1647	0,0290		
Relación agua regia	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
3:1	3	0,2145	0,0715	0,0132		
2:2	3	0,3891	0,1297	0,0010		
1:3	3	0,6300	0,2100	0,0134		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Tamaño	0,0060	2	0,0030	0,2434	0,7948	6,9443
Relación agua regia	0,0290	2	0,0145	1,1760	0,3965	6,9443
Error	0,0494	4	0,0123			
Total	0,0844	8				
F<FC	se acepta la hipótesis nula para los tres tamaños de tarjeta					
F<FC	se acepta la hipótesis nula para la relación con agua regia					

Fuente: Elaboración propia

Análisis de varianza para el Pb, en tamaño y relación de agua regia

Tamaño (cm)	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
0,5	3	1,3317	0,4439	0,0213		
1,0	3	1,3687	0,4562	0,0101		
1,5	3	1,1684	0,3895	0,0822		
Relación agua regia	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
3:1	3	0,8067	0,2689	0,0126		
2:2	3	1,4724	0,4908	0,0224		
1:3	3	1,5897	0,5299	0,0230		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Tamaño	0,0076	2	0,0038	0,1395	0,8738	6,9443
Relación agua regia	0,1189	2	0,0594	2,1919	0,2276	6,9443
Error	0,1085	4	0,0271			
Total	0,2349	8				
F<FC	se acepta la hipótesis nula para los tres tamaños de tarjeta					
F<FC	se acepta la hipótesis nula para la relación con agua regia					

Fuente: Elaboración propia

Análisis de varianza para la electrodeposición de Cu, en tamaño y relación de agua regia

Tamaño (cm)	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
0,5	3	0,3300	0,1100	0,0320		
1,0	3	0,2067	0,0689	0,0035		
1,5	3	0,3200	0,1067	0,0112		
Relación agua regia	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
3:1	3	0,2633	0,0878	0,0146		
2:2	3	0,0733	0,0244	0,0003		
1:3	3	0,5200	0,1733	0,0166		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	0,0031	2	0,0016	0,1044	0,9032	6,9443
Columnas	0,0335	2	0,0167	1,1183	0,4114	6,9443
Error	0,0599	4	0,0150			
Total	0,0965	8				
F<FC	se acepta la hipótesis nula para los tres tamaños de tarjeta					
F<FC	se acepta la hipótesis nula para la relación con agua regia					


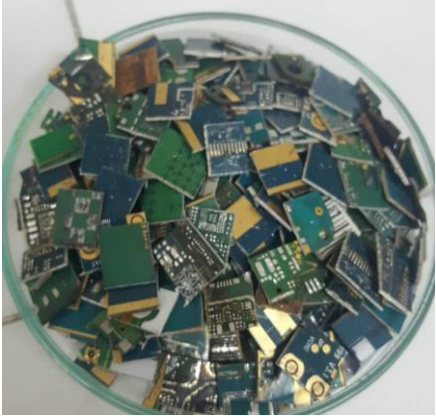

Fuente: Elaboración propia



Apéndice 6. **Materiales iniciales**

<p>Teléfonos recolectados</p>	
<p>Equipo para desmontar celulares y extraer tarjeta</p>	
<p>Tarjeta de teléfonos celulares</p>	




Continuación apéndice 6

<p>Tamaño de tarjeta 0,5 cm</p>	
<p>Tamaño de tarjeta 1,0 cm</p>	
<p>Tamaño de tarjeta 1,5 cm</p>	



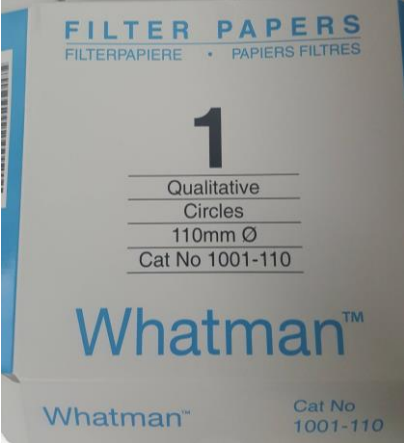
Fuente: Elaboración propia

Apéndice 7.

Material y equipo para cuantificación de metales

<p>Horno mufla (50 °C – 1 400 °C)</p>	
<p>Balanza analítica (0 a 2 kg)</p>	
<p>Campana de extracción</p>	

Continuación apéndice 7

<p>Horno de convección forzada (40 – 170 °C)</p>	
<p>Espectrofotómetro de fluorescencia de rayos X</p>	
<p>Papel filtro (retención de partículas 11 µm )</p>	

Fuente: Elaboración propia

Apéndice 8. **Materiales y equipo para electrodeposición de cobre**

<p>Alambre de cobre (calibre 14)</p>	
<p>Alambre de paso de corriente</p>	
<p>Llaves</p>	
<p>Batería 9 V</p>	

Fuente: Elaboración propia



## ANEXOS

### Anexo 1. Lixiviación ácida con agua regia



Fuente: LAFIQ, Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala

### Anexo 2. Residuos restantes después de la lixiviación que contienen metales



Fuente: LAFIQ, Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala

### Anexo 3. Neutralización de la solución lixiviada



Fuente: LAFIQ, Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala

### Anexo 4. Proceso de filtración



Fuente: LAFIQ, Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala



Anexo 5. **Solución lixiviante neutralizada**



Fuente: LAFIQ, Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala

Anexo 6. **Secado en horno de convección forzada**



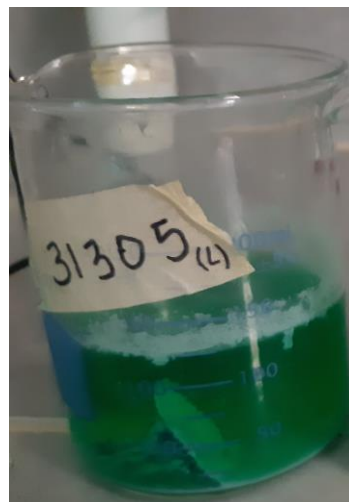
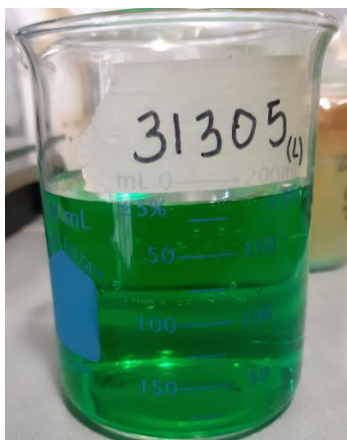
Fuente: LAFIQ, Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala

Anexo 7. **Análisis en el espectrofotómetro de fluorescencia de rayos X**



Fuente: LAFIQ, Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala

Anexo 8. **Solución lixiviada antes y después de la electrodeposición**



Fuente: Centro Logístico, Anillo Periférico zona 11, Guatemala

Anexo 9. **Celda electrolítica utilizada**



Fuente: Centro Logístico, Anillo Periférico zona 11, Guatemala

Anexo 10. **Burbujeo sobre el cátodo**



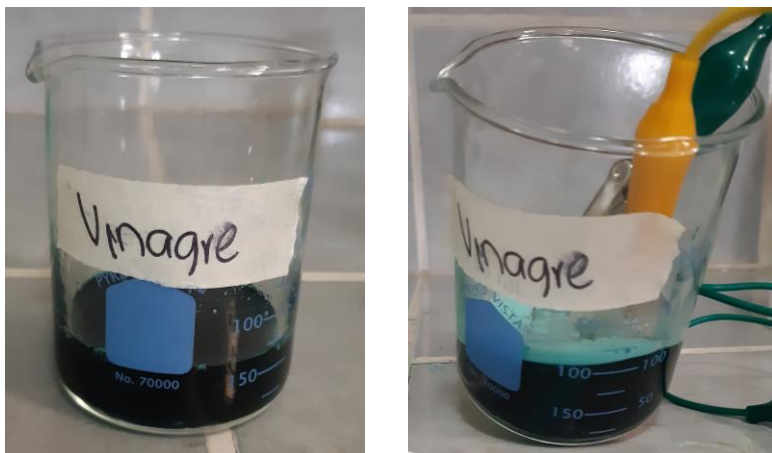
Fuente: Centro Logístico, Anillo Periférico zona 11, Guatemala

Anexo 11. **Cátodos y ánodos después de la electrodeposición**



Fuente: Centro Logístico, Anillo Periférico zona 11, Guatemala

Anexo 12. **Solución lixiviada antes y después de la electrodeposición con Vinagre**



Fuente: Centro Logístico, Anillo Periférico zona 11, Guatemala

Anexo 13. **Cátodo después de la electrodeposición con Vinagre**



Fuente: Centro Logístico, Anillo Periférico zona 11, Guatemala

Anexo 14. **Carbonización de tarjeta en horno mufla a 800 °C**



Fuente: LAFIQ, Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala

Anexo 15. **Carbonización de tarjeta en horno mufla a 700 °C**



Fuente: LAFIQ, Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala

Anexo 16. **Carbonización de tarjeta en horno mufla a 500 °C**



Fuente: LAFIQ, Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala