

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AGROINDUSTRIA

EVALUACIÓN DE DESECHOS DE VIDRIO EN LAS OPERACIONES
DE FUSIÓN DE CONCENTRADOS POLISULFURADOS
ECUATORIANOS

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
QUÍMICO

LUIS ALFONSO VÁSQUEZ ABAD

luis.vasquez.abad@hotmail.com

DIRECTOR: ING. MARCELO LOZADA.

marcelo.lozada@epn.edu.ec

Quito, enero del 2013

© Escuela Politécnica Nacional (2013)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Luis Alfonso Vásquez Abad, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Luis Alfonso Vásquez Abad

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Luis Alfonso Vásquez Abad, bajo mi supervisión.

Ing. Marcelo Lozada.
DIRECTOR DE PROYECTO

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio financiero del proyecto interno DEMEX 04 “Diseño de escorias para pirometalurgia de metales preciosos”, que se ejecuta en el Departamento de Metalurgia Extractiva.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por guiar mi camino y poner en él a las personas y oportunidades adecuadas para mi bienestar.

A mis padres que con su apoyo, comprensión y muchísima paciencia, me han dado la fortaleza para la culminación de este proyecto.

A mi tía adorada que aunque ya no me acompaña sigue siendo mi ejemplo de superación, valor y perseverancia.

A mí querida abuelita por ser tan cariñosa y demostrarme su apoyo día tras día.

A mis hermanas Alex, Mafer, mi sobrino Javy, mi primo Luis Roberto y mi tía Georgina quienes han sido las personas que han compartido de cerca los momentos más importantes de mi vida

A todos mis tíos, tías y primos, que siempre han sido un constante apoyo, aunque se encuentren distantes su cariño se siente muy cercano y eso siempre crea la añoranza de volver a la tierra de mis padres, el lindo y frío Cañar de mis amores.

Al Ing. Marcelo Lozada por su dirección y apoyo incondicional a este proyecto de investigación.

Al ingeniero Luis Mera miembro de mi tribunal y sobre todo por brindarme un apoyo constante a lo largo de toda mi carrera politécnica.

Al personal del DEMEX remarcando a los ingenieros, Ernesto de la Torre, Alicia Guevara, Ximena Díaz y Sebastián Espinoza por su gran aporte y ayuda en este trabajo.

A mis compañeros y amigos que me apoyaron y compartieron este largo periodo
politécnico.

DEDICATORIA

A Julia, Alba y Anita

ÍNDICE DE CONTENIDO

	PÁGINA
RESUMEN	xii
INTRODUCCIÓN	xiv
1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 El vidrio	1
1.1.1 Definición	1
1.1.2 Composición y estructura de los vidrio	3
1.1.3 Propiedades de los vidrios	4
1.1.4 Tipos de vidrios	9
1.1.5 Reciclaje	9
1.1.5.1 ¿Cómo se recicla el vidrio?	11
1.1.5.2 Ventajas de reciclar vidrio	11
1.2 Pirometalurgia	12
1.2.1 Principios termodinámicos de la pirometalurgia	12
1.2.1.1 Actividad	13
1.2.1.2 Afinidades y equilibrios químicos	17
1.2.2 Tostación	21
1.2.2.1 Definición de tostación	21
1.2.2.2 Tipos de tostación	22
1.2.3 Fusión	24
1.2.3.1 Fases de la fusión	24
1.2.3.2 Ensayo al fuego	26
1.2.3.3 Diagramas de fase	28
2 PARTE EXPERIMENTAL	32
2.1 Materiales	32
2.2 Caracterización física, química y mineralógica de los concentrados polisulfurados y del vidrio dedesecho	32
2.2.1 Tratamientos preliminares	33
2.2.1.1 Recolección y almacenamiento	33
2.2.1.2 Reducción de tamaño	33
2.2.1.3 Tostación oxidante	35
2.2.1.4 Determinación del tamaño de partícula para el vidrio molido en el molino de martillos y en el pulverizador	37
2.2.2 Caracterización física del vidrio de desecho y de los concentrados polisulfurados	38
2.2.2.1 Caracterización física del material de vidrio y de los concentrados polisulfurados	38
2.2.2.2 Caracterización química de los concentrados polisulfurados y del material de vidrio	39

	2.2.2.3 Caracterización mineralógica de los concentrados	44
2.3	Ensayos preliminares del uso de vidrio en las operaciones de fusión.	44
	2.3.1 Determinación del tamaño de partícula más favorable para la fusión	45
	2.3.2 Ensayos de fusión de vidrio con componentes de una carga fundente	45
	2.3.2.1 Fusión del vidrio pulverizado con carbonato de sodio	45
	2.3.2.2 Fusión del vidrio pulverizado con bórax	46
	2.3.2.3 Fusión del vidrio pulverizado con carbonato de calcio	46
	2.3.3 Ensayos de fusión de vidrio con cargas fundentes experimentales	47
2.4	Evaluación del uso de vidrio en la fusión a escala laboratorio de concentrados de Pachijal para obtener matas de cobre	48
	2.4.1 Preparación de la carga fundente para la obtención de las matas de cobre referencial	48
	2.4.2 Reemplazos de sílice por vidrio en la carga fundente para la obtención de matas de cobre	50
	2.4.3 Reemplazos de carbonato de sodio por vidrio en la carga fundente para obtener matas de cobre	51
	2.4.4 Ensayo sin la presencia de nitrato de sodio en la carga fundente para obtener matas de cobre	52
2.5	Evaluación del uso de vidrio en la obtención de cobre metálico a escala laboratorio a partir del concentrado de Pachijal	52
	2.5.1 Ensayo para la obtención de cobre metálico sin la presencia de vidrio en la fusión de matas de cobre	53
	2.5.1.1 Elaboración de matas sin presencia de vidrio	53
	2.5.1.2 Fusiones de las matas de cobre para la obtención de metal blanco	53
	2.5.1.3 Fusión del metal blanco para la obtención de cobre metálico	54
	2.5.2 Ensayo para la obtención de cobre metálico usando vidrio en la fusión de matas	54
	2.5.2.1 Elaboración de las matas de cobre	55
	2.5.2.2 Fusiones de las matas de cobre para la obtención de metal blanco	55
	2.5.2.3 Fusión del metal blanco para la obtención de cobre metálico	56
	2.5.3 Ensayo para la obtención de cobre metálico usando vidrio tanto en la elaboración de matas como en la fusión de las mismas	56
	2.5.3.1 Preparación y fusión de la carga fundente para la obtención de matas de cobre usando vidrio en su composición	56
	2.5.3.2 Fusiones de las matas de cobre para la obtención de metal blanco	60
	2.5.3.3 Fusión del metal blanco para la obtención de cobre metálico	61
2.6	Evaluación del uso de vidrio en las operaciones de fusión a escala laboratorio de concentrados de Pacto para recuperación de oro y plata	62
	2.6.1 Ensayo de recuperación de oro y plata referencial	62
	2.6.2 Reemplazos de vidrio bórax en la carga fundente para obtener oro y plata	65

2.6.3	Reemplazos de vidrio por carbonato de sodio en la carga fundente para obtener oro y plata	66
2.6.4	Uso de diferentes clases de vidrio en la carga fundente para obtener oro y plata	67
2.7	Caracterización de la carga fundente en un sistema ternario B_2O_3 - Na_2O - SiO_2	67
2.8	Evaluación económica del uso de los desechos de vidrio en las operaciones de fusión	68
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	69
3.1	Caracterización física de los concentrados polisulfurados de Pachijal y Pacto y de los desechos de vidrio	69
3.1.1	Análisis granulométrico de los desechos de vidrio	69
3.1.2	Determinación de la densidad de residuo del vidrio y de los concentrados polisulfurados	70
3.2	Caracterización química de los concentrados polisulfurados y del vidrio de desecho	70
3.2.1	Determinación de la concentración de metales en los concentrados de Pachijal y Pacto	70
3.2.2	Caracterización mineralógica de los concentrados	73
3.2.3	Caracterización química del vidrio de desecho por medio del microscopio electrónico de barrido	75
3.3	Ensayos preliminares del uso de vidrio en las operaciones de fusión	76
3.3.1	Determinación del tamaño de partícula más favorable para la fusión	76
3.3.2	Fusión de la mezcla vidrio con carbonato de sodio	77
3.3.3	Fusión de la mezcla vidrio con bórax	78
3.3.4	Fusión de la mezcla vidrio con carbonato de calcio	78
3.3.5	Ensayos de fusión de mezclas de vidrio con cargas fundentes experimentales	79
3.4	Evaluación del uso de vidrio en la fusión a escala laboratorio de concentrados de Pachijal para obtener matas de cobre	82
3.4.1	Preparación de la carga fundente para la obtención de las matas de cobre referencial	82
3.4.2	Reemplazos de sílice por vidrio en la carga fundente para la obtención de matas de cobre	85
3.4.3	Reemplazos de vidrio por carbonato de sodio en la carga fundente para obtener matas de cobre	92
3.4.4	Ensayo sin la presencia de nitrato de sodio en la carga fundente para obtener matas de cobre	96
3.5	Evaluación del uso de vidrio en la obtención de cobre metálico a escala laboratorio a partir del concentrados de Pachijal	98
3.5.1	Ensayo para la obtención de cobre metálico sin la presencia de vidrio en la fusión de matas de cobre	98

3.5.2	Ensayo para la obtención de cobre metálico usando vidrio en la carga fundente	102
3.5.3	Ensayo para la obtención de cobre metálico usando vidrio tanto en la elaboración de matas como en la fusión de las mismas	104
3.6	Evaluación del uso de vidrio en las operaciones de fusión a escala laboratorio de concentrados de Pacto para recuperar oro y plata	108
3.6.1	Preparación de la carga fundente referencial para la obtención de oro y plata	108
3.6.2	Reemplazos de bórax por vidrio en la carga fundente para obtener oro y plata	109
3.6.3	Reemplazos de vidrio por carbonato de sodio en la carga fundente para obtener oro y plata	111
3.6.4	Ensayos de prueba y error	112
3.6.5	Uso de diferentes clases de vidrio en la carga fundente para obtener oro y plata	117
3.7	Caracterización de la carga fundente en un sistema ternario $B_2O_3-Na_2OSiO_2$	119
3.8	Evaluación económica del uso de los desechos de vidrio en las operaciones de fusión	121
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	125
4.1	Conclusiones	125
4.2	Recomendaciones	130
	BIBLIOGRAFÍA	130
	ANEXOS	135

ÍNDICE DE TABLA

		PÁGINA
Tabla 1.	Composición y características de algunos vidrios comerciales comunes	5
Tabla 2.	Tipos de vidrios y sus características	10
Tabla 3.	Calores de reacción a 700 [°C]	24
Tabla 4.	Tamices empleados para la realización del ensayo granulométrico del vidrio molido en un molino de rodillos.	37
Tabla 5.	Carga fundente utilizada para el ensayo al fuego para la determinación de oro y plata	41
Tabla 6.	d80 para el vidrio de desecho.	69
Tabla 7.	Densidad real y aparente, del vidrio de desecho y concentrados polisulfurados.	70
Tabla 8.	Concentración de metales pesados en el concentrado polisulfurado de Pacto	71
Tabla 9.	Carga fundente utilizada para el ensayo al fuego para la determinación de oro y plata	71
Tabla 10.	Contenido de Au y Ag en el concentrado de Pacto	72
Tabla 11.	Concentración de metales pesados en el concentrado polisulfurado de Pachijal	72
Tabla 12.	Contenido de Au y Ag en el concentrado de Pachijal	73
Tabla 13.	Análisis de difracción de rayos X del concentrado polisulfurado de la mina de Pachijal.	73
Tabla 14.	Análisis de difracción de rayos X del concentrado polisulfurado de la mina de Pacto	74
Tabla 15.	Análisis de residuos de vidrio mediante microscopía electrónica	75
Tabla 16.	Fusión de vidrio a diferentes granulometrías	76
Tabla 17.	Fusión de vidrio con diferentes porciones de CO_3Na_2 por 1h a 1 200 °C	77
Tabla 18.	Fusión de vidrio con diferentes porciones de Bórax por 1h a 1 200 °C	78
Tabla 19.	Fusión de vidrio con diferentes porciones de CaCO_3 por 1h a 1 200 °C	78

Tabla 20.	Ensayos realizados variando la composición del bórax en la carga fundente	80
Tabla 21.	Ensayos realizados variando la composición del Na_2CO_3 en la carga fundente	80
Tabla 22.	Ensayos realizados variando la composición del C en la carga fundente	81
Tabla 23.	Fusión de distintas clases de vidrio con la misma carga fundente	82
Tabla 24.	Cargas fundentes para la obtención de matas de cobre de referencia	83
Tabla 25.	Composición química de las matas de cobre de referencia	84
Tabla 26.	Composición química de las escorias del ensayo de matas de referencia	84
Tabla 27.	Cargas fundentes para la obtención de matas de cobre sustituyendo sílice por vidrio de desecho	85
Tabla 28.	Composición química de las matas de cobre sustituyendo sílice por vidrio	86
Tabla 29.	Composición química de las escorias del ensayo de obtención de matas de cobre sustituyendo sílice por vidrio	87
Tabla 30.	Cargas fundentes para la obtención de matas de cobre sustituyendo sílice por vidrio manteniendo 10 g constantes de sílice	88
Tabla 31.	Composición química de las matas de cobre manteniendo 10g de sílice constante e incrementos de vidrio	89
Tabla 32.	Composición química de las escorias del ensayo de obtención de matas de cobre manteniendo 10 g de sílice constante e incrementos de vidrio	90
Tabla 33.	Cargas fundentes para la obtención de matas de cobre sustituyendo sílice por vidrio manteniendo 20 g constantes de sílice	91
Tabla 34.	Composición química de las matas de cobre manteniendo 20 g de sílice constante e incrementos de vidrio	91
Tabla 35.	Composición química de las escorias del ensayo de obtención de matas de cobre manteniendo 20 g de sílice constante e incrementos de vidrio	92
Tabla 36.	Cargas fundentes para la obtención de matas de cobre sustituyendo Na_2CO_3 por vidrio	93
Tabla 37.	Composición química de las matas de cobre de la sustitución del Na_2CO_3 por vidrio	93
Tabla 38.	Composición química de las escorias del ensayo de obtención de matas de cobre con sustitución del Na_2CO_3 por vidrio	94

Tabla 39. Cargas fundentes para la obtención de matas de cobre con Na_2CO_3 constante mas adiciones de vidrio	95
Tabla 40. Composición química de las matas de cobre de la sustitución del Na_2CO_3 por vidrio	95
Tabla 41. Composición química de las escorias del ensayo de obtención de matas de cobre con sustitución del Na_2CO_3 por vidrio	96
Tabla 42. Cargas fundentes para la obtención de matas de cobre sin NaNO_3	97
Tabla 43. Composición química de la mata de cobre sin NaNO_3 en la carga	97
Tabla 44. Composición química de las escorias del ensayo de obtención de matas de cobre sin NaNO_3 en la carga	98
Tabla 45. Pesos de Matas obtenidas sin vidrio en su composición	99
Tabla 46. Carga fundente para obtener metal blanco	99
Tabla 47. Carga correctiva para obtener metal blanco	99
Tabla 48. Carga fundente para obtener Cu metálico	100
Tabla 49. Carga fundente para obtener Cu metálico	101
Tabla 50. Composición química del producto de la fusión del metal blanco	102
Tabla 51. Pesos de Matas para fundir con una carga fundente que contenga vidrio.	102
Tabla 52. Carga correctiva para fijar el Cu en la fase metálica.	103
Tabla 53. Carga correctiva para obtener Cu metálico	104
Tabla 54. Composición del producto de la fusión para obtener Cu metálico utilizando vidrio como fundente	104
Tabla 55. Pesos de Matas obtenidas con cargas fundentes con presencia de vidrio.	105
Tabla 56. Composición química de las matas obtenidas con cargas fundentes con vidrio	105
Tabla 57. Composición química del metal blanco obtenido con cargas fundentes con vidrio	106
Tabla 58. Carga correctiva para la obtención de Cu metálico	106
Tabla 59. Carga fundente de referencia para la obtención de Au y Ag	108

Tabla 60.	Resultados de la fusión de la carga fundente referencial	109
Tabla 61.	Carga fundente con reemplazos de bórax por vidrio para obtener Au y Ag	109
Tabla 62.	Resultados de la fusión de las cargas fundentes con reemplazos de bórax por vidrio	110
Tabla 63.	Carga fundente con reemplazos de Na_2CO_3 por vidrio para obtener Au y Ag	111
Tabla 64.	Resultados de la fusión de las cargas fundentes con reemplazos de Na_2CO_3 por vidrio	111
Tabla 65.	Carga fundente con una disminución de bórax y Na_2CO_3 y adiciones de vidrio	113
Tabla 66.	Resultados de la fusión de las cargas con una disminución de bórax y Na_2CO_3 y adiciones de vidrio	113
Tabla 67.	Cargas fundentes con una porción de 20 g de Na_2CO_3 y aumentos de vidrio	114
Tabla 68.	Resultados de la fusión de las cargas con una porción de 20 gr de Na_2CO_3 y adiciones de vidrio	114
Tabla 69.	Cargas fundentes con incrementos de CaCO_3	115
Tabla 70.	Resultados de la fusión de las cargas con incrementos de CaCO_3	115
Tabla 71.	Cargas fundentes con incrementos de C	116
Tabla 72.	Resultados de la fusión de las cargas con incrementos de C	116
Tabla 73.	Carga fundente diseñada	117
Tabla 74.	Resultados de la fusión de las carga fundente diseñada	117
Tabla 75.	Carga fundente con diferentes vidrios	118
Tabla 76.	Resultados de la fusión de las carga fundente con distintos vidrios	118
Tabla 77.	Porcentajes de Na_2O , B_2O_3 y SiO_2 en el sistema ternario para la calcina de Pacto	119
Tabla 78.	Porcentajes de Na_2O , B_2O_3 y SiO_2 en el sistema ternario la carga fundente con presencia de vidrio en su constitución	121
Tabla 79.	Precios de los reactivos que se utilizan en las cargas fundentes	122

Tabla 80. Composición y precios de las cargas fundentes de referencia y con replazos de vidrio para la obtención de Au y Ag	123
Tabla 81. Composición y precios de las cargas fundentes de referencia y con replazos de vidrio para la obtención de matas de Cu.	123
Tabla A1. Distribución del tamaño de partícula para el mineral de Pacto	137
Tabla A2. Parámetros definidos en el ensayo granulométrico para determinar el d80 del mineral de Pacto.	138
Tabla A3. Análisis de difracción de rayos X para calcular % de Si	171
Tabla A4. Cantidades de SiO_2 , Na_2O y B_2O_3 para el diagrama ternario	172

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1. Representación del ordenamiento de una estructura de sílice vítrea de un cristal de sílice.	2
Figura 2. Comparación del comportamiento del volumen específico con la temperatura de materiales cristalinos y no cristalinos.	6
Figura 3. Viscosidades de vidrios en función de la temperatura.	8
Figura 4. Diagrama de Ellingham.	20
Figura 5. Diagrama básico de tostación	22
Figura 6. Representación de composiciones en un sistema ternario por medio de coordenadas triangulares.	30
Figura 7. Visión en perspectiva de un modelo espacial de un sistema ternario con un eutéctico simple y sus compuestos ternarios.	31
Figura 8. Desechos de vidrio	32
Figura 9. Almacenamiento de botellas de vidrio en el laboratorio	33
Figura 10. Trituradora de mandíbulas.	34
Figura 11. Molino de rodillos	34
Figura 12. Vista exterior del pulverizador utilizado para la reducción de tamaño.	35
Figura 13. Interior de la mufla SEPOR	36
Figura 14. A la derecha el concentrado crudo y a la izquierda el concentrado tostado	36
Figura 15. Sistema de tamices Tyler y un sistema de agitación Rot-Tap	38
Figura 16. Microscopio electrónica de barrido, TESCAN, empleado en el análisis de elementos	40
Figura 17. Espectrofotómetro de absorción atómica, AAnalyst 300	41
Figura 18. Horno de crisol a gas fundiendo.	42
Figura 19. Horno de crisol a gas apagado.	42

Figura 20.	Fusión vertida en la lingotera de acero.	49
Figura 21.	Matas recién fundidas	49
Figura 22.	Matas de cobre libres de escoria.	50
Figura 23.	Carga fundente antes de ser homogenizada	57
Figura 24.	Carga fundente colocada en un crisol de grafito	58
Figura 25.	Colado del producto de la fusión en una lingotera de fundición de hierro.	58
Figura 26.	Producto de la fusión reposando en la lingotera de fundición de hierro.	59
Figura 27.	Mata de cobre cubierta de escoria.	59
Figura 28.	Escoria que recubre una mata de cobre.	60
Figura 29.	Mata de cobre libre de escoria	60
Figura 30.	Metal blanco	61
Figura 31.	Vertido del producto fundido.	63
Figura 32.	Copelación de un régulo de Pb que contiene Au y Ag.	64
Figura 33.	Doré de Au y Ag	64
Figura 34.	Fusión de vidrio sin reactivo en función del tiempo	77
Figura 35.	Escoria de fusión por mata sin concentración excesiva de Cu	87
Figura 36.	Escoria de color rojizo por presencia excesiva de Cu	88
Figura 37.	Fusión en crisol de grafito	101
Figura 38.	Metal blanco con presencia de Cu incrustado en la escoria	106
Figura 39.	Cobre metálico incrustado en la escoria	107
Figura 40.	Escoria con presencia de Cu	107
Figura 41.	Grafico de recuperación de Au en función de la presencia de bórax en la carga fundente	110
Figura 42.	Gráfico de recuperación de Au en función de la presencia de Na_2CO_3 en la carga fundente	112

Figura 43.	Diagrama ternario Na_2O , B_2O_3 y SiO_2 para la carga fundente referencial para el concentrado de pacto	120
Figura 44.	Diagrama ternario Na_2O , B_2O_3 y SiO_2 para la carga fundente con presencia de vidrio en su constitución	121
Figura A1.	Porcentaje retenido acumulado vs abertura del tamiz.	138
Figura A2.	Caracterización química de fase escoria, ensayo 1.	140
Figura A3.	Caracterización química de fase escoria, ensayo 2.	141
Figura A4.	Caracterización química de fase escoria, ensayo 3.	142
Figura A5.	Caracterización química de fase escoria, ensayo 4.	143
Figura A6.	Caracterización química de fase escoria, ensayo 5.	144
Figura A7.	Caracterización química de fase mata, ensayo 6.	145
Figura A8.	Caracterización química de fase mata, ensayo 7.	146
Figura A9.	Caracterización química de fase mata, ensayo 8.	147
Figura A10.	Caracterización química de fase mata, ensayo 9.	148
Figura A11.	Caracterización química de fase mata, ensayo 10.	149
Figura A12.	Caracterización química de metal blanco de cobre, ensayo 11.	150
Figura A13.	Caracterización química de fase mata, ensayo 12.	151
Figura A14.	Caracterización química de fase mata, ensayo 13.	152
Figura A15.	Caracterización química de fase escoria, ensayo 14.	153
Figura A16.	Caracterización química de fase escoria, ensayo 15.	154
Figura A17.	Caracterización química de fase escoria, ensayo 16.	155
Figura A18.	Caracterización química de fase mata, ensayo 17.	156
Figura A19.	Caracterización química de fase mata, ensayo 18.	157
Figura A20.	Caracterización química de fase mata, ensayo 19.	158
Figura A21.	Caracterización química de fase mata, ensayo 20.	159
Figura A22.	Caracterización química de fase escoria, ensayo 21.	160

Figura A23. Caracterización química de fase escoria, ensayo 22.	161
Figura A24. Caracterización química de fase escoria, ensayo 23.	162
Figura A25. Caracterización química de fase escoria, ensayo 24.	163
Figura A26. Caracterización química de fase escoria, ensayo 25.	164
Figura A27. Caracterización química de fase escoria, ensayo 26.	165
Figura A28. Caracterización química de fase escoria, ensayo 27.	166
Figura A29. Caracterización química de fase mata, ensayo 28.	167
Figura A30. Caracterización química de fase mata, ensayo 29.	168
Figura A31. Caracterización química de fase mata, ensayo 30.	169
Figura A32. Caracterización química de fase mata, ensayo 31.	170

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I	
Caracterización física del desecho de Vidrio y de los concentrados polisulfurado	137
ANEXO II	
Ejemplo de cálculo pruebas de ensayo al fuego	139
ANEXO III	
Composición de matas y escorias analizadas por microscopia electrónica de barrido	140
ANEXO IV	
Determinación de la composición de SiO_2 , Na_2O y B_2O_3 para ubicar en un diagrama ternario	171

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó el uso de desechos de vidrio de botellas en la fusión de concentrados polisulfurados ecuatorianos provenientes de las zonas de Pacto y Pachijal, mediante la adición de vidrio en las cargas fundentes sustituyendo a algunos de sus componentes. El vidrio fue reducido de tamaño y junto a los concentrados polisulfurados fueron caracterizados física, química y mineralógicamente. A continuación los concentrados fueron tostados para realizar ensayos al fuego para determinar oro y plata en el caso del concentrado de Pacto y matas de cobre para el concentrado de Pachijal.

Se realizó ensayos referenciales sin la presencia de vidrio en la composición de la carga fundente para tener un patrón con el cuál comparar cada nuevo ensayo que se realice con presencia de vidrio de desecho.

Las pruebas que se realizaron fueron la sustitución parcial y total de la sílice, el Na_2CO_3 y el bórax; así también se fue probando diferentes porcentajes de los reactivos en las cargas para la obtención de una mata de cobre, para la obtención del metal blanco de Cu y tratar de obtener el Cu metálico. Dando así una disminución en el uso del bórax del 16,67%, así como la disminución del 33,33% del uso de Na_2CO_3 y una sustitución total de la sílice por desecho de vidrio, originando esto un ahorro del 18,66% en comparación a los ensayos de referencia.

Para el concentrado de Pacto se realizaron ensayos de sustitución total y parcial de Na_2CO_3 y bórax además de alterar las composiciones de los componentes de las cargas para la obtención de oro y plata. Arrojando un resultado que se puede reducir el consumo del bórax en un 33,33% y del Na_2CO_3 en un 25%, provocando que se dé un ahorro del 12,2% en comparación del ensayo referencial.

Además se realizó un diagrama de equilibrio ternario $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ para el concentrado de Pacto, y al colocar las composiciones de los mencionados óxidos obtenidos de la carga fundente referencial como de la carga óptima se puede

notar que la temperatura de fusión baja de 800° C de la carga referencial a cerca de los 750° C para la carga óptima, esta disminución de aproximadamente 50° C es un ahorro de energía para la realización de estas fusiones.

INTRODUCCIÓN

El país todavía no es un productor industrial de concentrados sulfurados u oxidados de diferentes metales como: Fe, Cu, Pb, Zn, Ni, solamente se ven algunos trabajos esporádicos de concentrados por flotación especialmente en la provincia de El Oro, en los centros mineros de Zaruma, Portovelo, Ponce Enríquez, San Gerardo en donde hay pequeñas producciones de estos concentrados. Pero el país tiene un muy buen potencial minero y está a punto de arrancar plantas procesadoras de grandes dimensiones donde se obtendrán cantidades industriales de concentrados.

Solamente la empresa Ecuacorrientes S.A el plan de mina estima una capacidad inicial de procesamiento de 27000 ton/d para una duración de 19 años según las reservas probadas actuales. (ECSA, 2010)

Debido a las grandes cantidades de minerales con que se podría trabajar en la metalurgia ecuatoriana, también se utilizaría mucha materia prima para la pirometalurgia de estos materiales, es por eso que este proyecto está enfocado al estudio del uso de vidrio de desecho que contiene un porcentaje muy alto de óxido de silicio que es un reactivo fundamental en las cargas fundentes para la extracción de metales preciosos.

La capacidad de formar más o menos escoria en un proceso pirometalúrgico depende de los óxidos presentes. Así el SiO_2 es un buen escorificante de la cal. Como el principal componente de las escorias es el SiO_2 se puede establecer un paralelismo entre los vidrios y las escorias. (Castells, 2009)

A la recuperación de esos desechos y su transformación en nueva materia prima se le llama reciclaje. Reciclar es recuperar los desechos domésticos e industriales para utilizarlos en el proceso para la fabricación de nuevos envases. El reciclaje trae consigo ventajas de orden ecológico, económico y social. Se puede afirmar que la práctica del reciclaje ayuda a disminuir la producción de basura, prolonga la vida de los rellenos sanitarios, ahorra energía, ayuda a conservar los recursos

naturales, es fuente de empleos y recursos económicos y fomenta la disciplina social. (CRIDESA, 2011)

La empresa municipal de aseo revela que solo en Quito se recogen 100 toneladas de desechos sólidos cada día, de las cuales un 3.27% es de vidrio de desecho. (Emaseo, 2010)

Con todo lo antes expuesto se puede ver que este estudio es una respuesta a la necesidad de buscar alternativas para el aprovechamiento de los desechos sólidos como lo es el vidrio, que por su volumen representa un problema de contaminación ambiental ya que provoca la saturación de los vertederos.

1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 EL VIDRIO

Desde hace mucho tiempo atrás se cita una leyenda contada por un antiguo militar romano Plinio el viejo que cuenta los primeros aparecimientos del vidrio, se dice que cuando unos comerciantes Fenicios buscaban donde encender fuego para preparar sus alimentos, colocaron unos bloques grandes de una piedra rica en sosa que traían como carga sobre las arenas de una playa. El calor fundió la mezcla de arena y carbonato de sodio y, al enfriarse, dejó como residuo el primer vidrio fabricado por el hombre en el año 5000 a.C. (Sanz, 2005; Vitro, 2011).

Los orígenes del vidrio no están muy claros, ya que al parecer su aparición es muy antigua. Se dice que pudo haber aparecido como subproducto de otra manufactura, hay muchos expertos que no coinciden en que si fue la cerámica o la metalurgia. Hay autores que han creído probar que el vidrio surgió de la cerámica, que ya en el IV milenio a.C. se usaba ampliamente en Egipto y Mesopotamia. Por otro lado otros opinan que el hecho de que el auge del vidrio coincida en el tiempo con el de la metalurgia apoya la hipótesis de este origen (Sanz, 2005).

1.1.1 DEFINICIÓN

A los vidrios suelen definirlos como un “líquido subenfriado con una viscosidad infinita” se puede decir que a una temperatura ambiente al vidrio se lo puede apreciar como un sólido por su rigidez debido a su altísima viscosidad de masa fundida, pero no se los puede encasillar como tales ya que aunque a simple vista tengan similares propiedades estos tienen una estructura amorfa y no una cristalina que es la que caracteriza y define a un sólido. Por otro lado tampoco se debe utilizar el término de líquido ya que estos aunque estén subenfriados tienen un equilibrio interno lo que difiere del vidrio.

Se podría definir al vidrio por sus propiedades, entonces se puede decir que es un producto de origen inorgánico con una estructura amorfa que está constituido básicamente por sílice, que es duro, frágil, algunas veces transparente, que tiene la capacidad de ser resistente a las agresiones químicas y que se deforma a altas temperaturas

Tomando en cuenta diferentes criterios se diría que el vidrio es un producto de materiales inorgánicos fundidos, ópticamente transparentes que se ha enfriado hasta un estado rígido sin poseer la estructura de un cristal. [Chang, 2002; Castells, 2009; Smith, 1998].

En la figura 1 se representa el ordenamiento de las estructuras de la sílice vítrea y de un cristal de sílice, a la derecha se presenta una estructura de sílice vítrea y a la izquierda un cristal de sílice, El círculo amarillo representa el átomo de oxígeno y el negro el de silicio.

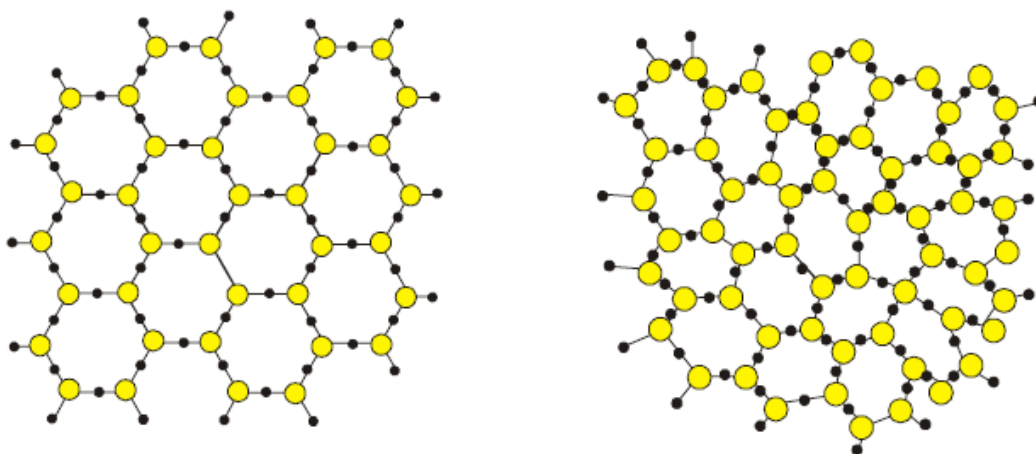


Figura 1. Representación del ordenamiento de una estructura de sílice vítrea de un cristal de sílice.

(Fernández Navarro, 2003).

1.1.2 COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DE LOS VIDRIOS

Desde el punto de vista químico la constitución del vidrio se da por la combinación de tres grupos de óxidos: Óxidos formadores, óxidos modificadores y óxidos estabilizadores.

Óxidos formadores. La mayoría de los vidrios inorgánicos están basados en el óxido de silicio como óxido formador que forma la unidad básica compuesta de unidades estructurales que se repiten a distancias regulares. El cuarzo (SiO_2) suele estar perfectamente cristalizado y la mayoría de las veces libre de impurezas, es muy inerte y es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre. Este elemento tiene la capacidad de formar vidrio por sí solo si lo elevamos a muy altas temperaturas (mayores a $1700\text{ }^\circ\text{C}$) y lo dejamos enfriar, este es el caso del vidrio de sílice que tiene una altísima resistencia al choque térmico, pero la obtención de tan altas temperaturas es muy costoso, es por eso que se utilizan los óxidos modificadores para bajar el punto de fusión. El óxido de Boro B_2O_3 también es un óxido formador de vidrio y también es un aditivo muy importante para ciertos tipos de vidrios comerciales como vidrios de borosilicatos y aluminoborosilicatos.

Óxidos modificadores Son los óxidos que ocupan los intersticios de la red principal del vidrio, se los conoce también como modificadores de red que se encargan de debilitar los enlaces (disminuyen la energía para romperlos). Los óxidos alcalinos como Na_2O y K_2O ; y los alcalinotérreos del tipo de CaO y MgO son incorporados al vidrio de sílice para poder bajar su viscosidad y de esta manera conseguir un modelado y trabajo más fácil del mismo, en conclusión estos óxidos afectan a la fusibilidad y estabilidad de la red vítrea.

Óxidos estabilizadores estos óxidos son de origen básico como el óxido de calcio que tiene propiedades fundentes, los óxidos de plomo, que aparte de ser fundentes; proporcionan al vidrio refracción y brillo, los óxidos de zinc y aluminio que ayudan con la resistencia mecánica y a la resistencia al choque térmico, y la adición de óxidos de magnesio o de bario ayudarán al vidrio para que tenga una

mayor cohesión y resistencia que hace que este sea insoluble y resistente a los ácidos y al agua. [Castells, 2009; Smith, 1998; Sanz, 2005]

En la distinta variedad de vidrios que tenemos en el mercado podemos ver que existen de diversos colores, esto también se debe a la presencia de diferentes óxidos que dan un color característico al vidrio, a continuación se detalla algunos de los óxidos que presentan colores característicos.

- Óxido de hierro, pueden dar colores rojos, marrones, verdes y azules
- Óxidos de cromo, pueden dar lugar a verdes y amarillos
- Óxidos de cobre, pueden dar colores verdes turquesas y azules
- Óxidos de cobalto, colores azules
- Óxidos de manganeso, puede presentar coloraciones violetas, marrones y negro.
- Óxidos de níquel, puede dar color violeta, negro y azul.
- Óxidos de vanadio, puede dar lugar a amarillos verdes y azules
- Óxidos uranio, dan colores amarillos y negros.

(Castells, 2009)

En la tabla 1 se presenta algunos porcentajes de las composiciones de diversos óxidos que caracterizan a algunos tipos de vidrios comerciales y algunas características y aplicaciones. (Callister, 1998).

1.1.3 PROPIEDADES DE LOS VIDRIOS

Las propiedades del material vítreo depende mucho de sus características estructurales y por tanto, de cuestiones como composición y temperatura.

Tabla 1. Composición y características de algunos vidrios comerciales comunes

Tipo de vidrio	Composición en porcentaje en peso						Características y Aplicaciones
	<i>Si O₂</i>	<i>Na₂O</i>	<i>CaO</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>B₂O₃</i>	<i>Otros</i>	
Sílice fundida	99,5						Alta temperatura de fusión, muy bajo coeficiente de dilatación (resistente al choque térmico)
Sílice (96%) (Vycor)	96				4		Resistente al choque térmico y al ataque químico: material de laboratorio
Borosilicato (Pyrex)	81	3,5		2,5	13		Resistente al choque térmico y al ataque químico: material para hornos
Recipientes (Sosa-Cal)	74	16	5	1		4 MgO	Baja temperatura de fusión, conformación fácil, durabilidad
Fibra de vidrio	55		16	15	10	4 MgO	Fácilmente estirada en forma de fibras materiales compuestos de resina-vidrio
Vidrio Óptico	54	1				37PbO, 8K ₂ O	Alta densidad y alto índice de refracción: lentes ópticas
Vitrocerámica	70			18		4,5TiO ₂ , 2,5Li ₂ O	fácilmente fabricada; resistente; resiste el choque térmico: material para hornos

El vidrio por tratarse de un material no cristalino, solidifica muy distinto que los materiales cristalinos, este se hace cada vez más viscoso a medida que la temperatura va decreciendo, pero no existe una temperatura definida a la cual el fundido se transforme en sólido como lo es en los materiales cristalinos, de hecho una de las distinciones entre los materiales cristalinos y no cristalinos está en la dependencia del volumen específico con la temperatura, como se puede ver en la figura 3, en los materiales cristalinos se ve una disminución discontinua en volumen a una temperatura de fusión T_m . En cambio para el material vítro el volumen disminuye continuamente con la reducción de temperatura; la temperatura en la que se ve un ligero cambio en la pendiente es denominada temperatura de transición vítrea, T_g , Por debajo de esta temperatura, se considera que el material es un vidrio, y por encima primero el material estará como líquido subenfriado y finalmente como un líquido (Callister, 1998).

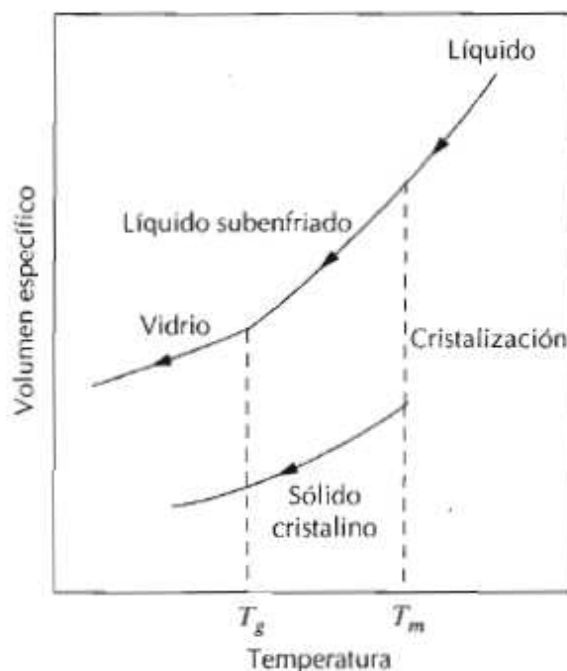


Figura 2. Comparación del comportamiento del volumen específico con la temperatura de materiales cristalinos y no cristalinos.
(Callister, 1998)

Viscosidad

La viscosidad de un fluido se puede definir como el rozamiento interno o la resistencia al deslizamiento que existe entre sus moléculas. En el caso de los gases ideales, se supone que la movilidad de las moléculas es absoluta; cuando se trata de líquidos hay siempre un cierto grado de viscosidad que es característica de cada uno. La unidad de viscosidad empleada es el Pascal por segundo (Pa-s) o su submúltiplo, el dPa-s.

Los vidrios sufren cambios de viscosidad en función de la temperatura a la que se encuentren. Existen una serie de puntos de viscosidad fijos:

- Punto de liquidus o punto de fusión. El vidrio tiene una gran fluidez y puede ser tratado como un líquido lo que facilita ciertos procesos. La viscosidad asignada a este punto es 10 Pa-s.
- Punto de conformación o de trabajo. El vidrio adquiere la viscosidad adecuada para trabajar con él (por ejemplo, en el soplado a boca o los procesos industriales). La viscosidad de este punto es 10^3 dPa-s.

- Punto de reblandecimiento o ablandamiento. Cuando se calienta un fragmento de vidrio progresivamente, se va volviendo cada vez más fluido. Cuando llega al punto de reblandecimiento, el vidrio, antes rígido, comienza a ablandarse y puede deformarse por efecto de la gravedad cuando está suspendido. Le corresponde una viscosidad de $4 \times 10^6 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.
- Punto inferior de recocido. Es la temperatura la cual la viscosidad es $4 \times 10^{12} \text{ Pa}\cdot\text{s}$; a esta temperatura, la difusión atómica es suficientemente rápida para que cualquier tensión residual pueda ser eliminada, el intervalo de temperaturas en el que un vidrio, al enfriarse, pasa del estado plástico al estado rígido
- Punto de deformación. Es la temperatura a la cual la viscosidad alcanza valores de $3 \times 10^{13} \text{ Pa}\cdot\text{s}$; para las temperaturas menores del punto de deformación, la fractura ocurre antes de la deformación plástica. La temperatura de transición vítrea estará por encima del punto de deformación. [Fernández, 2003; Callister, 1998; Smith, 1998].

En la figura 3 se muestra el comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura de diversos tipos de vidrio.

Tensión superficial

El manejo de los vidrios y la temperatura se determina por la tensión superficial, si la tensión superficial es alta, el ángulo de contacto entre la gota de vidrio y el sólido (ángulo agudo) provoca que durante el enfriamiento la superficie resultante sea rugosa y puede darse una reabsorción de burbuja (las burbujas pueden ser ocasionadas por los gases que producen la descomposición de los carbonatos), por lo contrario si la tensión superficial es baja (ángulo de contacto entre la gota de vidrio y el sólido es obtuso) ayuda a la eliminación de burbujas y la textura del vidrio es lisa.

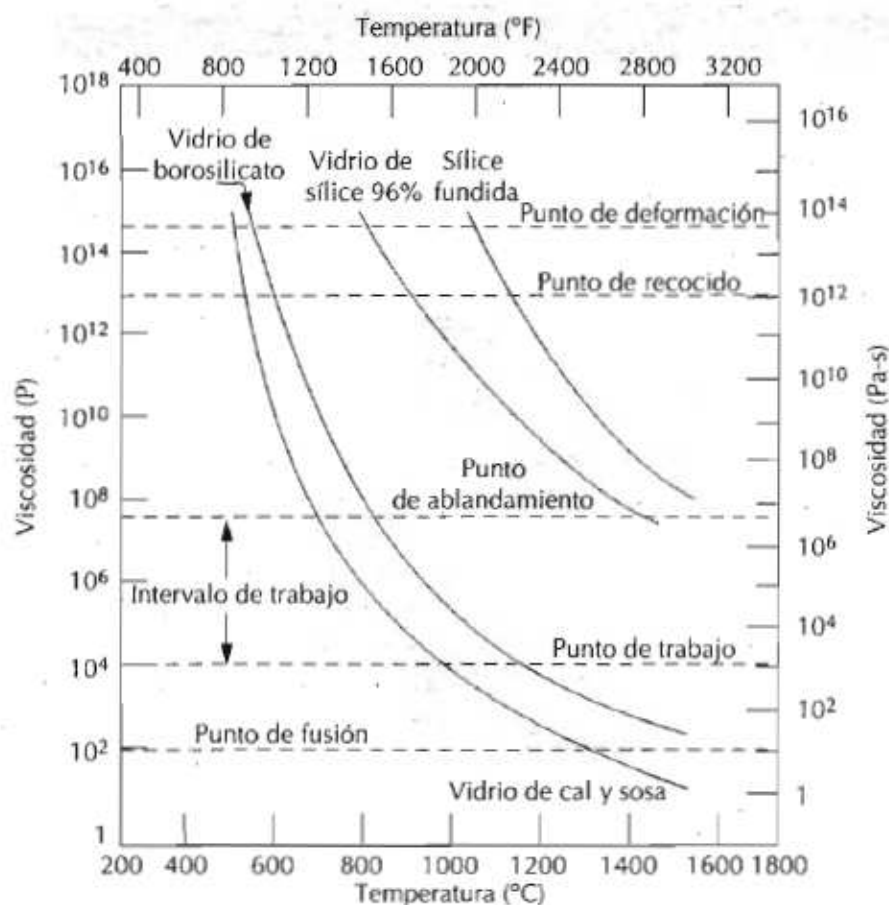


Figura 3. Viscosidades de vidrios en función de la temperatura.
(Callister 1998)

Densidad

Es la cantidad de masa contenida en la unidad de volumen. La mayoría de los vidrios comunes de composición silícea sodocálcica, tienen una densidad aproximada de $2,5 \text{ g/cm}^3$. Algunos vidrios de borosilicato tienen una densidad menor (cerca de 2 g/cm^3), mientras que los vidrios de plomo o cristal oscilan entre los 3 g/cm^3 y los 6 g/cm^3 .

Dilatación térmica

La mayoría de los materiales experimenta una dilatación como consecuencia de la aplicación de calor. Pero no todos los materiales se dilatan y contraen a la misma velocidad y en la misma medida. Esta viene determinada por el coeficiente de dilatación o de expansión térmica, cuya unidad de medida es el K^{-1} .

En los vidrios el coeficiente de expansión viene determinado principalmente por la composición. Varía en cada tipo de vidrio.

Para asegurar un óptimo comportamiento del vidrio cuando va enfriándose a la salida del horno, el coeficiente de dilatación debe ser el menor posible. Esto es difícil de conseguir, es por eso que el vidrio debe ser aplicado sobre un soporte, como en el caso de la cerámica, siempre es mejor que el esmalte quede sometido a compresión (osea que el coeficiente de dilatación sea inferior al soporte cerámico). En caso contrario el esmalte se hallara sometido a tracción y se presentara un cuarteo. Pero si la compresión del esmalte (vidrio parcialmente recristalizado) es excesiva se presentarían descascarillados o escamados. Los vidrios no soportan los esfuerzos de tracción. (Castells 2009).

1.1.4 TIPOS DE VIDRIOS

Según su volumen de fabricación a los vidrios podríamos clasificarlos en:

- Comerciales
- Especiales

Los vidrios comerciales son producidos en gran escala para un sin número de aplicaciones, mientras que los vidrios especiales son menos comunes ya que están diseñados para usos específicos, y sus costos son más elevados, a continuación la tabla 2 resumirá los tipos de vidrios y sus características.

1.1.5 RECICLAJE

La historia del reciclado es aún muy corta, pero su concepción socioeconómica se basa en el ahorro de materia prima para poder preservar y reducir el uso de los recursos naturales y a su vez tener la capacidad de controlar la producción de residuos no deseados.

Tabla 2.Tipos de vidrios y sus características

Tipo de vidrio	Nombre	Características
Comerciales	Soda-cal	Este tipo de vidrio es el más utilizado, pues sus propiedades lo hacen adecuado para su uso con luz visible. Los recipientes hechos de vidrios de soda - cal son virtualmente inertes, no contaminado la materia que contienen ni su sabor. Son poco resistentes al choque térmico
	Plomo	Utiliza óxido de plomo en lugar de óxidos de calcio, y óxido de potasio en lugar de sodio, y se conoce comúnmente como cristal al plomo. Los vidrios al plomo tienen un alto índice de refracción y una superficie relativamente blanda, lo cual permite una fácil decoración por esmerilado, corte o tallado
	Borosilicato	Están compuestos principalmente de sílice (70-80%) y óxido bórico (7-13%) con pequeñas cantidades de álcalis (óxidos de sodio y potasio) y óxido de aluminio. Su principal característica es una buena resistencia a los choques térmicos.
Especiales	Sílice vítreo	Son vidrios hechos casi exclusivamente de sílice. Son necesarias temperaturas de fusión sobre 1 500°C.
	Vidrios de aluminosilicato	Contienen cerca de un 20% de óxido de aluminio (Al ₂ O ₃), además de óxido de calcio, óxido de magnesio y óxido de boro en cantidades relativamente pequeñas.
	Vidrio de sílice álcali-bario	Contiene una cantidad mínima de óxidos de plomo, bario o estroncio.
	Vidrios de borato	Contienen pequeñas cantidades o nada de sílice. Son usados para soldar vidrios, metales o cerámicas, a relativamente bajas temperaturas
	Vidrios de fosfato	Consisten principalmente en mezclas de pentóxido de vanadio (V ₂ O ₅) y pentóxido de fósforo (P ₂ O ₅)

(Comisión Nacional del Medio Ambiente-Región Metropolitana, 1999).

El vidrio se lo ha utilizado desde la antigüedad que desde entonces ha adquirido una importancia trascendental debido a su infinidad de aplicaciones, convirtiéndose en un material indispensable, es por eso que el reciclar nos permite preservar recursos naturales y con esto ayudar a la conservación del medio ambiente. (Infoecología,2011)

1.1.5.1 ¿Cómo se recicla el vidrio?

Una vez recolectado el vidrio se procede a su limpieza. El vidrio puede ser recogido en una diversidad de colores, esto influye en la producción de nuevos envases de un color definido como el blanco debido a que se tiene que usar decolorantes, de esto se puede concluir que es mejor una pre selección de los envases recogidos para ser tratados por colores.

El vidrio posteriormente es liberado de cualquier pieza de plástico para luego ser lavado para remover cualquier vestigio de tierra o grasa que se encuentre presente, una vez que esté limpio se lo pasa por distintos martillos y tamices hasta lograr la granulometría deseada. También es necesario remover metales presentes con la ayuda de diversos imanes. Luego de todos los procesos mencionados se funde a 1600°C utilizando un 50% de vidrio reciclado y un 50% de materia prima virgen para la elaboración de nuevos envases de vidrio.

(Gálvez y Mata, 2010)

1.1.5.2 Ventajas de reciclar vidrio

Reciclar vidrio trae consigo beneficios sociales, ambientales y económicos debido a que se da un ahorro energético muy valioso. Si se usan 3000 botellas para fabricar nuevos envases se ahorra 130 kg de combustible ya que el vidrio reciclado funde a una temperatura más baja, se puede decir que el vidrio reciclado ahorra entre el 25% y el 32% de la energía utilizada para fabricar un nuevo vidrio.

Hay datos estadísticos que sugieren que con la energía que se ahorra en el reciclaje de una botella se podría mantener prendido un foco de 100 vatios por 4 horas. Si bien es cierto que el ahorro energético es significativo, no es el único beneficio, también podemos ver que el ahorro de materias primas ayuda a no destruir terrenos por extracción y así se evita destruir muchos ecosistemas, se dice que reciclando 3 000 envases de vidrio se ahorra una tonelada de materias

primas, usar vidrio reciclado ayuda a usar menos recursos naturales como arena silícica que se extrae de las minas y tiene un elevado consumo energético.

También las practicas de reciclaje ayudan a reducir la contaminación de los suelos, así 3 000 botellas depositadas en contenedores para un posterior uso equivale a 1 000kg menos de basura.

También se puede mencionar sobre como ayuda el reciclaje a la conservación del agua y evitar la contaminación del aire. El aire se contamina menos si se quema menos combustible como ocurre cuando se trabaja con vidrio reciclado, aparte que se disminuye el consumo del agua en la mitad.

(Infoecologia,2011)

1.2 PIROMETALURGIA

La pirometalurgia es la rama de metalurgia que estudia la extracción y purificación de metales no reactivos. Permite obtener metales a partir de sus minerales o de sus concentrados por medio del calor. Se trata principalmente de extraer el metal del mineral, eliminar la ganga del mineral y purificar los metales.

1.2.1 PRINCIPIOS TERMODINÁMICOS DE LA PIROMETALURGIA

Todas las sustancias y los elementos no permanecen sin cambios, aunque a veces pareciera que no tienen actividad, si la tienen, a veces consigo mismos, y la mayoría con otros elementos químicos, o con el medio ambiente. Por lo cual la actividad química que se la puede denominar reactividad química, pues es la forma en la cual actúa o ejecutan su actividad las sustancias químicas entonces se puede decir que la reactividad química de una sustancia o de una especie química es la capacidad de reacción química que presenta ante otros compuestos que están a su alrededor. (Wiley, 1983)

Por otro lado se dice que todas las especies químicas que forman compuestos químicos deben tener una tendencia o una disposición y a esto se lo denomina Afinidad.

En el desarrollo de la metalurgia se dan diversas mezclas de diferentes componentes, muchas de estas forman una sola fase ya sea esta líquida o gaseosa, así tendremos que expresar las funciones termodinámicas de un constituyente en función de otros constituyentes. Dicho de mejor manera se tendrá que siempre trabajar en función de las fracciones parciales ya sea para volúmenes, entalpías, entropías, energías libres de Gibbs y demás expresiones de componentes i .

1.2.1.1 ACTIVIDAD

Se puede definir como actividad de un componente i a la razón entre la fugacidad de un componente i en la solución y la fugacidad en su estado puro a las mismas condiciones de presión y temperatura.

$$a_i = \frac{f_i}{f_{0i}} \quad [1]$$

Donde:

a_i = actividad de un componente i

f_i = fugacidad del componente i en la solución

f_{0i} = fugacidad del componente en estado puro

P y T = cte

La función f conocida como fugacidad de un gas. Para un gas ideal la fugacidad es igual al valor de la presión del sistema para todos los valores de presión, pero por otro lado si el gas es real o no ideal se aproxima a ser ideal cuando la presión tiende a disminuir, se puede decir que si $P \rightarrow 0, f \rightarrow P$, por lo tanto la fugacidad puede ser una medida idealizada de la presión de un gas

$$a_i = \frac{P_i}{P_{0i}} \quad [2]$$

El enunciado combinado de la primera y segunda ley de la termodinámica para un sistema que efectúa un trabajo sometido a presión puede expresarse como:

$$dG = VdP - SdT \quad [3]$$

A temperatura constante la ecuación se reduce a

$$dG = VdP \quad [4]$$

Si se toma de referencia 1 mol de un gas ideal, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$dG = RTd \ln P \quad [5]$$

Si el gas no es un ideal, la ecuación toma la siguiente forma:

$$dG = RTd \ln f \quad [6]$$

Donde:

f = fugacidad

Si reemplazamos la ecuación [1] en la ecuación [6], tenemos

$$dG = RTd \ln (f^\circ a) \quad [7]$$

Integrando la ecuación anterior desde el estado estándar a cualquier estado arbitrario a $T = \text{cte}$

$$G - G^\circ = RT \ln a - RT \ln a^\circ \quad [8]$$

Donde:

a° = actividad en el estado estándar y es equivalente a 1

$$G - G^\circ = RT \ln a \quad [9]$$

Si se escoge como estado de referencia un elemento puro a una temperatura determinada tenemos la a conocida como actividad de Raoult.

Si tomamos como referencia una solución a una concentración determinada tenemos la a conocida como la actividad de Henry.

(Gilchrist, 1989)

Ley de Raoult.

En una de las conceptualizaciones de la ley de Raoult se expresa que el descenso relativo de la presión de un solvente debido a la adición de un soluto es igual a la fracción molar del soluto en la solución. Si consideramos dos sustancias A y B que están en solución. Consideramos que p^A y p^B son las presiones de las dos sustancias para cualquier composición impuesta y p^{A° y p^{B° son las presiones de vapor ejercidas por las sustancias A y B, entonces según la Ley de Raoult:

$$\frac{p^{A^\circ} - p^A}{p^{A^\circ}} = X_B \quad [10]$$

$$\frac{p^{B^\circ} - p^B}{p^{B^\circ}} = X_A \quad [11]$$

Donde:

X_A = Fracción molar de A

X_B = Fracción molar de B

Puesto que $(X_A + X_B) = 1$

La relación anterior se puede escribir de la siguiente manera:

$$\frac{p^A}{p^{A^\circ}} = X_A \quad [12]$$

$$\frac{P_B}{P_B^\circ} = X_B \quad [13]$$

Si generalizamos

$$\frac{P_i}{P_i^\circ} = X_i \quad [14]$$

Si suponemos que se tiene un comportamiento ideal, reemplazamos en la ecuación [1]

$$a_i = x_i \quad [15]$$

Según la ecuación [9] podemos apreciar que la presión de vapor de cualquier componente de una solución es directamente proporcional a la fracción molar de ese componente en la misma, siempre que se acepte que la solución cumple la ley de Raoult.

La solución que cumpla con la ley de Raoult se la designa como solución ideal.

Se puede observar que en las soluciones la actividad de un componente es directamente proporcional a su fracción molar. Su valor puede ser de mayor o menor valor al esperado, entonces podemos apreciar desviaciones positivas y negativas de la ley de Raoult.

(Pehlke, 1984)

Ley de Henry

Una solución real es aquella que en la ecuación [10] no cumple aunque sea para uno de sus componentes. Para este caso se introduce un factor de corrección γ_i conocido como coeficiente de actividad del componente i , solo introduce en la ecuación [10] para poder aplicar en las soluciones reales

$$a_i = \gamma_i x_i \quad [16]$$

$$\frac{a_i}{x_i} = \gamma_i \quad [17]$$

El coeficiente de actividad depende de la temperatura, de la presión y de la composición.

Si la solución es ideal $\gamma_i = 1$

La ley de Henry establece que la presión parcial de vapor de un soluto en una solución diluida es proporcional a su fracción molar

Si en una solución A-B, al soluto se lo designa A, de acuerdo con la ley de Henry

$$p_A = k_A x_A \quad [18]$$

Donde k_A es una constante para la temperatura dada. Dividiendo la expresión por p_A° tenemos

$$a_A = \text{constante} \cdot x_A \quad [19]$$

La constante en la ecuación anterior es igual a la pendiente de la curva de concentración 0 de A y se la designa γ°_A y se le designa como el coeficiente de actividad a dilución infinita. [Pehlke, 1984; Kubaschewski, y Alcock, 1979]

1.2.1.2 AFINIDADES Y EQUILIBRIOS QUÍMICOS

En el trabajo metalúrgico siempre existen diferentes fases lo que ocasiona que se den sistemas heterogéneos.

Una descripción cuantitativa del equilibrio fue efectuada por los químicos noruegos Guldberg y Waage, que la expresaron que la ley de acción de las masas establece que para una reacción reversible en equilibrio a una temperatura constante, la relación de las concentraciones de reactantes y productos se expresan en términos de una constante de equilibrio.

Estudios experimentales muestran que para cualquier reacción:



Donde a , b , c y d son los coeficientes estequiométricos, la expresión de la constante de equilibrio a una temperatura dada será igual a

$$K = \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \quad [21]$$

La variación de la energía libre de Gibbs de la reacción

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln K \quad [22]$$

En donde K es en principio función de la temperatura (el efecto de la P es generalmente despreciable)

Si se trata en particular de una reacción en fase gaseosa, donde los gases se comportan idealmente, las actividades que intervienen dentro de la expresión K pueden ser reemplazadas por las presiones parciales.

Considerando que $\Delta G^\circ = \Delta H^\circ + T\Delta S$, se puede entonces calcular la composición de cada fase presente en el equilibrio a la temperatura (T) mediante el uso de ciertas hipótesis (como aquella consistente en admitir que los gases se comportan idealmente) y la añadidura de ecuaciones de la conservación de la masa.

Para la afinidad de una reacción química, sea la reacción



Que tiene lugar a presión y temperatura constante.

Se llama afinidad (AT) de la reacción a la expresión:

$$AT = -\Delta G_T \quad [24]$$

La reacción esta en equilibrio si (afinidad) $-\Delta G_T = 0$

La reacción tiende a producirse de izquierda a derecha, si $-\Delta G_T > 0$

La reacción tiende a producirse de derecha a izquierda, si $-\Delta G_T < 0$

Considerando que a la energía libre de reacción a la temperatura T, se la expresa de la siguiente forma

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln K \quad [25]$$

A la afinidad estándar le corresponde la ecuación

$$A^\circ T = -\Delta G^\circ \quad [26]$$

Lo que también corresponde

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad [27]$$

En el equilibrio $\Delta G_T = 0$, por lo cual

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ = -RT \ln K \quad [28]$$

De donde se obtiene que

$$A^\circ T = -\Delta H^\circ + T\Delta S^\circ = RT \ln \quad [29]$$

Los diagramas de Ellingham presentan afinidad en función de la temperatura, como se muestra en la figura 4 para un conjunto de reacciones de formación de combinaciones simples a partir de los elementos constitutivos, por ejemplo:

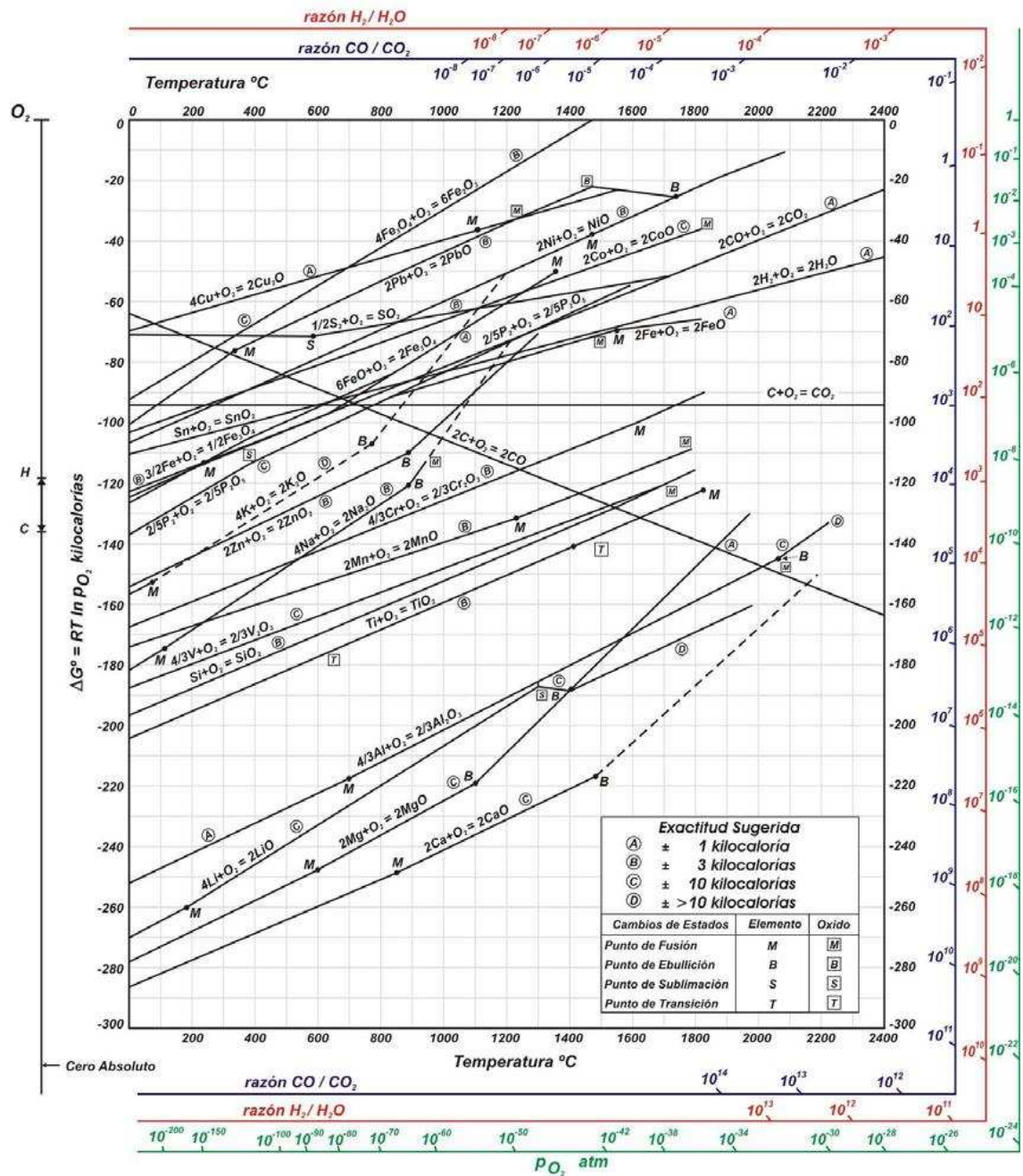


Figura 4. Diagrama de Ellingham.
(Chamorro, 2010)

En todas las reacciones presentadas en el diagrama interviene la misma cantidad de reactivo, en este caso una mol de oxígeno.

Lo importante de este gráfico es que permite ver rápidamente y dentro de un muy grande rango de temperaturas, la estabilidad relativa de los diferentes óxidos, los unos a respecto de los otros, dentro de su estado de referencia.

Se presentan diagramas de Ellingham relativo a óxidos, sulfuros, etc.; así mismo este diagrama es presentado de tal forma que se hace aparecer en el eje de las ordenadas la afinidad de la reacción y en el eje de las abscisas la temperatura ($-\Delta G^\circ$ vs T); los metales que tienen la afinidad más fuerte por el oxígeno se encuentran entonces en la parte superior del diagrama.

[Gilchrist, 1989; Kubaschewski y Alcock, 1979]

1.2.2 TOSTACIÓN

Los metales preciosos de interés para el presente trabajo (oro, plata y cobre) están presentes en la naturaleza de diversas formas mineralógicas, pero una de ellas y la que es relevante en nuestra investigación son los sulfuros, por ejemplo el oro puede estar asociado a sulfuros como la pirita, pirrotita, galena, blenda, etc. Diversos autores denotan que alrededor del 80% del cobre que se produce en todo el mundo proviene de minerales de sulfuros. Estos sulfuros presentan dificultades para ser lixiviados, por decirlo de otra manera no se los puede extraer directamente por medios hidrometalúrgicos, siempre es necesario un proceso de tostación. (Davenport, 2002)

1.2.2.1 DEFINICIÓN DE TOSTACIÓN

La tostación es una operación piro metalúrgica donde se calienta el mineral o concentrado a elevadas temperaturas pero sin llegar a provocar una fusión o una fusión mínima, con el fin de realizar una modificación química.

En la figura 5 se representa un diagrama básico de tostación.



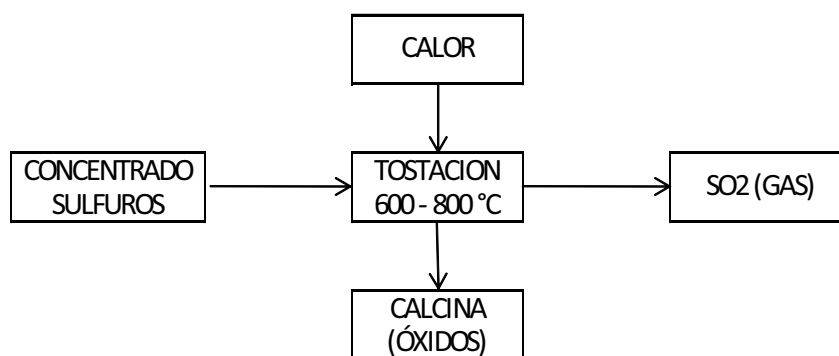


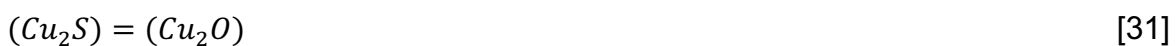
Figura 5. Diagrama básico de tostación

1.2.2.2 TIPOS DE TOSTACIÓN

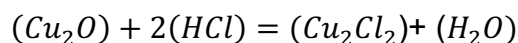
Dentro de los procesos de tostación se cita los principales:

(Rovira y Pereira, 1982)

- Tostación oxidante para convertir sulfuros o sulfatos a óxidos



- Tostación volatilizante (generalmente en atmósfera neutra) para eliminar elementos de alta presión de vapor como As, Sb o Zn, los que se pueden recuperar por condensación.
- Tostación Clorurante para convertir a cloruros u óxidos, sulfuros o metal como el proceso de segregación de cobre:



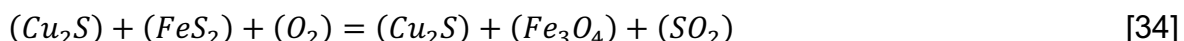
[32]

- Tostación Sulfatante, en que un sulfuro se oxida parcialmente a sulfato. El proceso de oxidación sulfatante es empleado extensamente ya que permite, controlando las condiciones, convertir la totalidad del cobre a

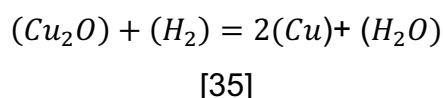
cobre soluble (sulfato) el cual puede ser entonces lixiviado y precipitado en forma convencional:



- Tostación Magnética, en la óxidos de hierro, normalmente hematita, se reducen a magnetita para su separación magnética posterior.



- Tostación Reductora, en que un óxido se reduce a metal.



- Calcinación, en que se descompone térmicamente un carbonato o sulfato a óxido.



- Sinterización, en que la carga se sinteriza con o sin oxidación o reducción y se prepara la carga para el horno de Fusión. Aunque se ha mencionado anteriormente que la tostación de concentrados tiene como propósito eliminar azufre, o convertir parte o todo el FeS_2 en óxidos de hierro para su posterior separación en la Fusión, en otros casos la Tostación se efectúa solo para producir un gas con alto contenido de SO_2 y convertirlo a H_2SO_4 , como la Tostación pirítica. Como norma general, en las Plantas modernas que emplean equipos tostadores del tipo fluosólido o flash, se recupera parte del calor generado ya que la oxidación de los sulfuros más comunes son reacciones fuertemente exotérmicas como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3. Calores de reacción a 700 [°C]

REACCIÓN	CALOR DE REACCIÓN
$\text{MoS}_2 + 7/2 \text{O}_2 = \text{MoO}_3 + 2\text{SO}_2$	-294 Kcal/g-mol
$\text{PbS} + \text{O}_2 = \text{PbO} + \text{SO}_2$	-83 Kcal/g- mol
$\text{ZnS} + 3/2\text{O}_2 = \text{ZnO} + \text{SO}_2$	-110Kcal/g- mol
$\text{FeS}_2 + 2.75\text{O}_2 = 1/2 \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{SO}_2$	-205Kcal/g- mol
$\text{Cu}_2\text{S} + 3/2\text{O}_2 = \text{Cu}_2\text{O} + \text{SO}_2$	-95Kcal/g- mol
$\text{NiS} + 1/2\text{O}_2 = \text{NiO} + \text{SO}_2$	-77Kcal/g- mol
$\text{CoS}_2 + 5/2\text{O}_2 = \text{CoO} + 2\text{SO}_2$	-141Kcal/g- mol

1.2.3 FUSIÓN

La fusión es el proceso que tiene por objetivo obtener un producto en estado líquido. El fin de la fusión es eliminar las impurezas de metales comunes de alto grado para así concentrarlos para producir en el caso de los metales preciosos un lingote de oro y plata que contiene normalmente más del 95% de estos metales. El producto de fusión, llamada lingotes de doré, es propicio para la venta directa y / o para refinar aún más [Marsden y House, 1993; Rovira y Pereira, 1982]

Desde un punto de vista químico se puede clasificar a las fusiones según la atmosfera del horno así podemos ver que existen:

- Fusión neutra (o por mata)
- Fusión oxidante
- Fusión reductora
- Fusión cementante (este es un caso particular de la fusión reductora)

1.2.3.1 Fases de la fusión

El producto de la fusión nos da un sistema heterogéneo, esto implica que se deba definir el concepto de fase. Fase es toda porción de un sistema con la misma

estructura o arreglo atómico, con aproximadamente la misma composición y propiedades en todo el material que la constituye y con una interface definida con toda otra fase vecina. (Lenahan y Murray-Smith, 1997)

Fase metálica

Esta fase está constituida por metales o aleaciones fundidas, los metales verdaderos los cuales en el estado sólido cristalizan formando agrupaciones atómicas de tipo compacto, aumentan de volumen en aproximadamente 3%, su entropía en 2 cal/°C atm g, su resistividad y su coeficiente de expansión térmico en 50 al 100 %.

Por el contrario los semimetales (sea el caso del Ga, Ge, Sb, Bi, etc.) cuando están fundidos se ve que disminuye su resistividad y su entropía de fusión es dos o tres veces más elevada que para los metales verdaderos.

Algunos no metales son solubles en los metales, estos pueden ser: H₂, O₂, S, N₂, C, su solubilidad aumenta en la fusión del metal, sin embargo la presencia de impurezas, afectan a las propiedades de los metales [Marsden y House, 1993; Young, 1998]

Fase speiss

Esta fase de apariencia metálica, está compuesta por soluciones recíprocas de arseniuros y antimoniuros de metales pesados generalmente de los metales de transición como Fe, Co, Ni, Ar, Sb; la densidad es próxima a la de los metales, en esta fase pueden disolverse fácilmente los metales preciosos, el oro tiene gran afinidad con el arsénico. (Marsden y House, 1993)

Fase mata

Esta fase está constituida por soluciones recíprocas de sulfuros metálicos, como por ejemplo Cu₂S, FeS.

Las matas tienen un punto de fusión más bajo que las escorias son mucho más densas que estas, son inmiscibles en las escorias y en la fase metálica, tienen la

capacidad de disolver sulfuros. A las matas se las puede utilizar en la recolección de metales valiosos (comúnmente el Ni y Cu) o bien sea en la recolección de impurezas en la fase de los sulfuros (Young, 1998)

Fase escoria

La escoria puede ser definida como una fase que contiene sustancias inútiles de un mineral y que inevitablemente estará en cualquier operación pirometalurgia que involucre sistemas fundidos. (Lovera, 2002)

Esta fase está constituida en mayor parte por silicatos y boratos formados en la fusión, la composición de la escoria se basa principalmente en el diagrama ternario de óxidos que componen la carga fundente, esta fase presenta una estructura vidriosa y fácilmente quebradiza (Lenahan y Murray-Smith 1997).

La escoria tienen como objetivo principal, retener los óxidos conjuntamente con otros compuestos indeseables, y retener los compuestos formados a partir de las impurezas las cuales se desea remover (Da Costa, 1998).

Las características de las escorias son importantes en los procesos metalúrgicos, las mismas que deben garantizar la remoción de las impurezas y compuestos indeseables, además la fácil separación de la escoria de la fase metálica, es necesario que propiedades como viscosidad, punto de fusión, densidad y tensión superficial sean controladas y así mismo la adición de fundentes o formadores de escoria [Da Costa, 1998; Colón, 2002].

1.2.3.2 Ensayo al fuego

El ensayo al fuego es el más antiguo y, en muchos casos, sigue siendo el mejor método para la determinación de metales preciosos de los minerales y productos metalúrgicos. En esencia, el método que consta de dos separaciones piroquímicas consecutivas. La muestra finamente molida se fusiona con un flujo adecuado, bajo condiciones de reducción que promueven la separación de los

metales preciosos de la ganga, con la recolección simultánea, por lo general como una aleación de plomo. Posteriormente, el plomo se elimina por la fusión oxidante (copelación) y los metales preciosos, por lo tanto aisladas, están disponibles para la medición (Lenahan y Murray-Smith, 1997).

El proceso de fusión se realiza calentando el material en presencia de los flujos de la formación de escoria a temperaturas por encima del punto de fusión de todos los componentes de la carga, por lo general entre 1200 ° C y 1400 ° C. esta temperatura máxima se mantiene durante aproximadamente 1,5 horas para garantizar la completa separación de las impurezas en la escoria. La forma fundida de oro y plata en una aleación que es más pesado que la escoria y se hunde hasta el fondo del recipiente de fusión.

La eficiencia de la separación depende de la calidad de la escoria que es formada

La carga fundente.

Los principales componentes de la carga fundente son el carbonato de sodio, bórax, sílice y litargirio. La selección y las proporciones de los componentes de flujo son los factores más importantes para efectuar una fusión exitosa. Las propiedades químicas de los reactivos, por lo tanto, así como la naturaleza del mineral, debe entenderse de la mejor manera para poder realizar un buen ensayo.

- **Bórax:** El tetra borato de Sodio usado está en forma anhidra ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$). $10\text{H}_2\text{O}$. El Bórax se funde a 741°C, lo cual hace que disminuya el punto de fusión para toda la carga. Cuando se funde es muy viscoso, pero a altas temperaturas se convierte en un ácido fluido fuerte el cual disuelve y capta prácticamente todos los óxidos metálicos. Las grandes cantidades de Bórax pueden ser perjudiciales causando una escoria dura y poco homogénea. Además un exceso de Bórax puede dificultar la separación de fases debido a la reducción del coeficiente de expansión de la escoria y su acción de impedir cristalización.

- **Sílice:** El Dióxido de Silicio (SiO_2) funde a 1723°C y es el fundente ácido más fuerte y disponible que se tiene. Se combina con Óxidos metálicos para formar cadenas de silicato estables. Las escorias con alto contenido de Sílice son extremadamente viscosas y retienen excesivamente metálicos en suspensión.
- **Nitro:** El Nitrato de Sodio o de Potasio se añade para oxidar los metales básicos en la carga. Este es un agente oxidante muy poderoso cuyo punto de fusión es de 339°C . A bajas temperaturas el nitro se funde sin alteraciones; pero a temperaturas alrededor de 400°C se descompone produciendo oxígeno, el cual oxida a los sulfuros y algunos metales como el hierro, cobre y zinc. Se debe controlar la adición de Nitro porque al liberar Oxígeno ocasiona una reacción vigorosa y puede ocasionar el rebose en el crisol.
- **Carbonato de Sodio:** El Carbonato de Sodio (Na_2CO_3), es un fundente básico poderoso que funde a 850°C . En presencia de Sílice, el Carbonato de Sodio forma Silicato de Sodio con el desprendimiento de dióxido de carbono. Estos silicatos reaccionan con una variedad de Óxidos básicos para formar silicatos complejos. Además, debido a la facilidad natural para formar sulfatos alcalinos, también actúa como desulfurizante y un agente oxidante. El uso de El Na_2CO_3 proporciona transparencia a la escoria pero en cantidades excesivas origina escorias pegajosas e higroscópicas que son difíciles de remover del Doré.

[Marsden y House 1993; Lenahan y Murray-Smith 1997]

1.2.3.3 Diagramas de fase

Los materiales en estado sólido pueden existir en diversas formas o fases. El número de dichas fases puede ser alto incluso para sustancias puras, por citar ejemplo el hielo puede existir en varias fases sólidas y un metal tan importante como el hierro presenta hasta cuatro fases sólidas.

Diagramas ternarios

Como lo dice su nombre, un diagrama ternario se lo usa para representar una composición dada de tres sustancias que están inmiscuidas en una operación química establecida, en el caso que nos compete será la carga fundente que dará origen a las fases durante nuestro proceso de fusión.

El diagrama, también conocido como diagrama de fase o diagrama de equilibrio es una expresión gráfica de la regla de fases de Gibbs que permite calcular el número de fases que pueden coexistir en equilibrio en cualquier sistema. La ecuación siguiente presenta la regla de fases en la forma matemática usual:

$$F + L = C + 2 \quad [38]$$

Donde:

C: Número de componentes del sistema

F: Número de fases presentes en el equilibrio

L: Grados de libertad

Los términos usados en la expresión anterior se definen a continuación.

SISTEMA: es una porción del universo material que pueda aislarse totalmente y arbitrariamente de los demás, por consideración de los cambios que puedan ocurrir en su interior y bajo condiciones variantes.

FASE: es la porción del sistema físicamente homogénea consigo misma y separada por una superficie mecánicamente separable de otras porciones.

COMPONENTES: el menor número de variables individuales independientes (vapor, líquido o sólido) por medio de los cuales la composición del sistema se expresa cuantitativamente.

GRADOS DE LIBERTAD: es el número de variables (presión, temperatura y composición) que se pueden cambiar independientemente sin variar el número de fases en equilibrio en el sistema elegido.

EQUILIBRIO: Se dice que el equilibrio existe en cualquier sistema cuando las fases del mismo no conducen a ningún cambio en las propiedades con el paso del tiempo y permite que las fases tengan las mismas propiedades cuando se tienen las mismas condiciones con respecto a las variantes que se han alcanzado por procedimientos diferentes.

Las composiciones se las puede representar en coordenadas triangulares basándose en el método de Roozebum (o de Gibbs modificado), tal como se representa en la figura 6 y 7, allí cada lado del triángulo equilátero es dividido en cien partes y cada diez divisiones se interceptan líneas paralelas de cada una de los otros lados. Donde los vértices del triángulo representan los componentes puros. Un punto sobre la línea AB está compuesto enteramente por los componentes A y B sin C; la distancia relativa de un punto, tal como X a cada una de los tres vértices puede expresarse en porcentaje y por lo tanto puede representarse una composición porcentual de una mezcla ternaria o solución en términos de los componentes A, B, C. El punto x por ejemplo representa una composición en porcentajes de A, B y C.

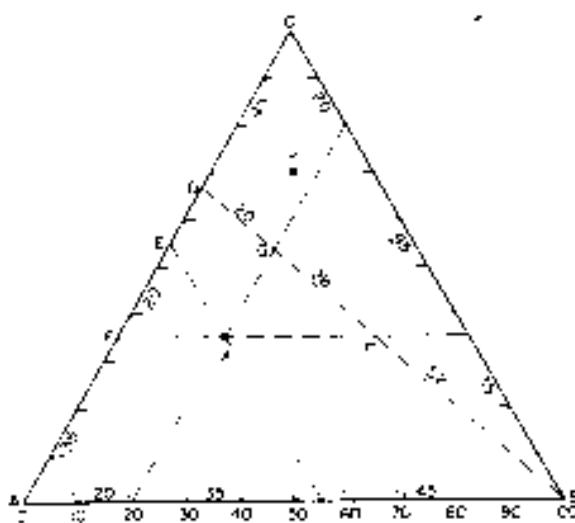


Figura 6. Representación de composiciones en un sistema ternario por medio de coordenadas triangulares.
(Restrepo 98)

Un diagrama de composición triangular tiene también la ventaja que una serie de adiciones de un tercer componente a la mezcla, para cualquier relación de los otros dos componentes, puede representarse por una línea recta desde el vértice del tercer componente.

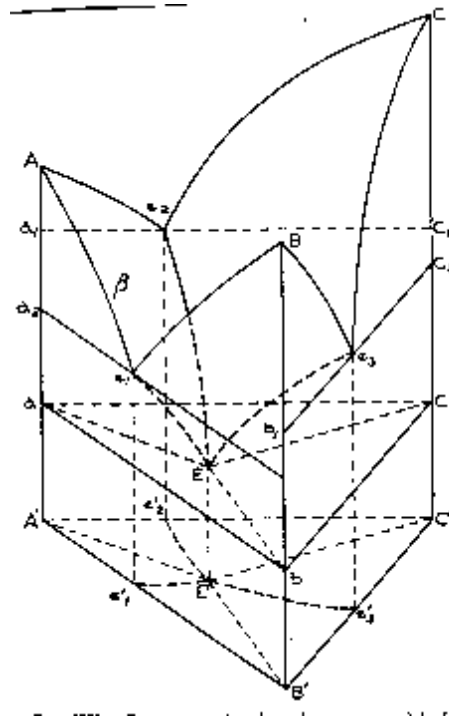


Figura 7. Visión en perspectiva de un modelo espacial de un sistema ternario con un eutéctico simple y sus compuestos ternarios.
(Restrepo 98)

La temperatura puede representarse por líneas rectas perpendiculares al plano del triángulo de composición y por lo tanto no pueden mostrarse directamente en una superficie bidimensional aún así, la temperatura de una superficie térmica (usualmente la superficie líquidus) puede indicarse en intervalos de temperatura uniforme usando isotermas como se hace con las curvas de nivel en los mapas topográficos.

2 PARTE EXPERIMENTAL

2.1 MATERIALES

Para este trabajo se utilizó concentrados polisulfurados de la zona de Pachijal y Pacto (provincia de Pichincha), obtenidas de un proceso de flotación convencional.

El vidrio de desecho normalmente se lo encuentra como desechos sólidos de las ciudades ya que estas lo producen por toneladas diariamente.



Figura 8. Desechos de vidrio

2.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE LOS CONCENTRADOS POLISULFURADOS Y DEL VIDRIO DE DESECHO

En el presente proyecto de investigación, se busca insertar el vidrio reciclado de desecho en las operaciones de fusión, ya sean estas las fusiones por mata o la fusión para extracción de oro. Para este propósito se realizaron una serie de pretratamientos al vidrio como también a los concentrados polisulfurados para

elaborar cargas fundentes adecuadas para el buen despeño del ensayo al fuego. A continuación se presenta un resumen de la metodología experimental utilizada.

2.2.1 TRATAMIENTOS PRELIMINARES

2.2.1.1 Recolección y almacenamiento

Los minerales polisulfurados fueron almacenados en recipientes sellados para prevenir oxidación y contaminación durante el transcurso de este estudio.

Para obtener desechos de vidrio, se recolectaron botellas de los alrededores de la Escuela Politécnica Nacional, las mismas que fueron recogidas durante el transcurso de algunos días y trasladadas a un sitio de acopio, donde se las almacenó, para luego lavarlas exhaustivamente con agua y jabón, en esta etapa de limpieza se removió todo tipo de artefacto plástico adherido a las botellas. Luego, se las clasifico por su color y marca de producto.



Figura 9. Almacenamiento de botellas de vidrio en el laboratorio

Reducción de tamaño

Los desechos de vidrio fueron reducidos de tamaño en cuatro pasos:

1. Disminución de tamaño manual con la ayuda de un martillo se fracturó una a una las botellas.
2. El vidrio previamente fracturado se alimenta a una trituradora de mandíbulas que se muestra en la figura 10, (Tamaño de muela 18.5 X 7.5 cm. y motor de 2 HP), donde se consigue un menor tamaño.



Figura 10. Trituradora de mandíbulas.

3. El material triturado se alimenta a un molino de rodillos de fabricación nacional (Rodillo de 15cm de ancho y 12 cm de diámetro, y motor de 3 HP), que se muestra en la figura 11.



Figura 11. Molino de rodillos

4. El vidrio molido se alimenta a un pulverizador, cuya capacidad es de 150 gramos. El pulverizador consta de una cámara cilíndrica con tapa, diámetro de 14 cm y altura 4,4 cm. Dentro de la cámara se encuentran dos partes móviles, una de ellas tiene una forma anular con diámetro externo de 12 cm, espesor 1,2 cm y altura 4,2 cm. La otra parte móvil es un cilindro sólido que tiene un diámetro de 7 cm y una altura de 4 cm. La cámara tiene un movimiento centrífugo y vertical, lo cual permite que las partes móviles choquen contra las paredes de la cámara y pulvericen el material. El tiempo de pulverización fue de un minuto.

En la figura 12, se muestra el pulverizador empleado para pulverizar el vidrio de desecho.



Figura 12. Vista exterior del pulverizador utilizado para la reducción de tamaño.

2.2.1.2 Tostación Oxidante

El concentrado polisulfurado de Pachijal y el de Pacto tienen contenidos de sulfuros importantes que deberán ser tostados antes de ser usados en las operaciones de fusión.

Se realizó una tostación oxidante de los concentrados polisulfurados con el fin de remover los sulfuros y formar óxidos. Se utilizó una mufla eléctrica SEPOR INC. que se presenta en la figura 13. Esta presenta un control automático de

temperatura, lo cual permite fijar un valor de este parámetro al interior de la misma. El horno puede trabajar hasta una temperatura de 960 °C] La mufla presenta una cámara de calentamiento con una capacidad de $48.71 \cdot 10^{-3} \text{m}^3$ (27,5 cm de altura, 41 cm de ancho y 43,2 cm de profundidad).



Figura 13. Interior de la mufla SEPOR

El concentrado fue cuarteado, pesado y luego colocado en un plato cerámico el cual fue introducido en la mufla, la cual se encontraba a temperatura ambiente. A continuación se programó al equipo para que alcance una temperatura de 800[°C], el tiempo en el que alcanza dicha temperatura es de dos horas. Una vez que se alcanzó la misma, se retiró el plato del horno y se dejó enfriar como se puede apreciar en la figura 14.



Figura 14. A la derecha el concentrado crudo y a la izquierda el concentrado tostado

2.2.1.3 Determinación del tamaño de partícula para el vidrio molido en el molino de martillos y en el pulverizador

La determinación del tamaño de partícula del vidrio de desecho luego del proceso de molienda y el de pulverizado se realizó a través de un análisis granulométrico del material, para lo cual se empleó un sistema de tamices Tyler y un sistema de agitación Rot-Tap que se puede apreciar en la figura 15, con capacidad para 7 tamices y un recipiente que actúa de fondo. Este sistema se caracteriza por presentar dos tipos de agitación, centrífuga y de golpe vertical. Se cargó el sistema de tamizado con el peso correspondiente a una botella, el cual varía dependiendo del tamaño de la misma entre 20 y 25 gramos, las mallas empleadas para este proceso se detallan a continuación en la tabla 4.

Tabla 4. Tamices empleados para la realización del ensayo granulométrico del vidrio molido en un molino de rodillos.

Malla	Abertura de malla (um)
10	2000
20	850
30	600
40	425
50	300
60	250
70	210
80	180
100	150
150	106
200	75
270	53
325	45
400	38

Se determina el peso retenido en cada una de las mallas empleando una balanza Boeco con capacidad máxima de 300 g y precisión de 0,01 g. Con los pesos obtenidos, se determina el porcentaje retenido de material en cada tamiz, el

porcentaje retenido acumulado y por último el porcentaje pasado acumulado. Con este último parámetro, se grafica la curva granulométrica y se determina el d80 del material.



Figura 15. Sistema de tamices Tyler y un sistema de agitación Rot-Tap

2.2.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL VIDRIO DE DESECHO Y DE LOS CONCENTRADOS POLISULFURADOS

2.2.2.1 Caracterización física del material de vidrio y de los concentrados polisulfurados.

Para la caracterización física del vidrio de desecho tanto como de los concentrados polisulfurados, se llevó a cabo la medición de algunos parámetros como: la densidad real, densidad relativa y la granulometría.

La densidad real de los concentrados tanto como del vidrio se la pudo obtener con el uso de un picnómetro de laboratorio.

- Se pesa el picnómetro vacío y seco
- Se pesa el picnómetro con 1gr de muestra y lleno de agua a temperatura ambiente
- Se pesa el picnómetro solo con agua

La densidad real es igual a:

$$densidad_{real} = \frac{1}{1 + \frac{(pic+H_2O)-(pic+m+H_2O)}{(pic+m)-(pic\ vacio)}} \frac{g}{ml} \quad [39]$$

La densidad relativa de los concentrados y del material pulverizado de vidrio la obtuvimos con la ayuda de una probeta siguiendo el siguiente procedimiento

- Se pesa una probeta de volumen establecido
- Se pesa la probeta cuando esta aforada con el material deseado
- Mediante diferencia de los valores antes establecidos se obtiene el peso del material que ocupó el volumen designado.
- La densidad aparente es igual a:

$$densidad\ aparente = \frac{M}{V} \quad [40]$$

Donde:

M= masa

V= volumen

La determinación de la granulometría se la llevo a cabo utilizando un set de tamices estandarizados (Tyler), este método se lo describió en el inciso anterior.

2.2.2.2 Caracterización química de los concentrados polisulfurados y del material de vidrio

Caracterización química del vidrio.

La caracterización química del material de vidrio, por tratarse de una muestra amorfa y con alto contenido de sílice silicio, tuvo que ser analizada por medio de microscopia electrónica empleando un microscopio electrónico de barrido Tescan con analizador de rayos X Quantax que se lo presenta en la figura 17. El vidrio se lo fracturo con el propósito de conseguir lo más cercano posible a una sección recta. El fragmento de vidrio se lo coloco en la cámara del microscopio y se procedió a realizar el análisis. Se determino una imagen del material y se realizó

una serie de aumentos, de esta forma es posible observar la estructura del vidrio y determinar un análisis químico elemental del material, con la ayuda del software Espirit 1.8 Bruker.



Figura 16. Microscopio electrónica de barrido, TESCAN, empleado en el análisis de elementos

Caracterización química de los concentrados polisulfurados.

Se determinó los metales de interés; Ca, Al, Fe, Cu, Mg, Zn, empleando absorción atómica (AAnalyst 300, PERKIN ELMER), además se determinó el contenido de Au y Ag mediante ensayos al fuego.

Para el análisis de absorción atómica, se realizó una disgregación ácida de los concentrados, de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Se pesó 100 miligramos de concentrado y se los coloco en un reactor de teflón con 3 ml de ácido nítrico y 3 ml de ácido fluorhídrico
- Se colocó en un microondas durante 2 minutos y medio a potencia 50%
- Se dejó enfriar durante 20 minutos
- Se añadió 5 ml de ácido clorhídrico
- Se volvió a calentar en el microondas durante 2.5 minutos a potencia 50%
- Se dejó enfriar durante 20 minutos
- Se aforó en un matraz de 100 ml
- La solución aforada se analizó por absorción atómica,



Figura 17. Espectrofotómetro de absorción atómica, AAnalyst 300

- Para la determinación de oro y de plata presente en los concentrados polisulfurados se utilizó el método de ensayo al fuego. Este método consiste en fundir la muestra usando una carga fundente, para obtener dos fases líquidas: una escoria constituida principalmente por silicatos complejos y una fase metálica de plomo, el cual colecta los metales nobles de interés, en éste caso oro y plata. El plomo una vez que se enfría se solidifica y es separado de la escoria como un régulo, el cual es oxidado en caliente en una copela de magnesita y absorbido por ella, quedando en su superficie el doré de oro y plata. La carga fundente utilizada se presenta en la tabla 5., En cada ensayo al fuego se utilizó 30 g de concentrado.

Tabla 5. Carga fundente utilizada para el ensayo al fuego para la determinación de oro y plata

Reactivo	Peso (g)
Bórax	30
Na ₂ CO ₃	40
PbO	40
CaCO ₃	7
C	2

Para la fusión se utilizó un horno de crisol, que funciona a través de la combustión de gas licuado de petróleo (GLP) en una cámara de material refractario, donde se

alimenta el aire necesario por medio de un blower. Se opera a una temperatura aproximada de 1200 °C. Este equipo es de construcción nacional, tiene una capacidad de $9,74 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ (25,4 cm de altura y 22,1 cm de diámetro). En la cámara se puede cargar crisoles número 5, los mismos que pueden contener 300 gramos de muestra cada uno. En la figura 18 y19, se muestra el horno de crisol empleado para la fusión.



Figura 18. Horno de crisol a gas fundiendo.



Figura 19. Horno de crisol a gas apagado.

Para el ensayo de fusión se realizó el siguiente procedimiento:

- Se pesa 30 gramos de concentrado polisulfurado, este concentrado fue tostado con anterioridad

- El concentrado tostado se mezcla con la carga fundente especificada en la tabla 4 y se homogeneizó
- Se coloca el material dentro de un crisol cerámico
- Se coloca, el crisol, en la cámara del horno
- Se funde la muestra a 1200 °C, durante 1 h
- Se remueve el crisol de la mufla y se vierte la muestra fundida en una lingotera metálica con el fin de acumular el régulo de plomo en la parte inferior
- Se deja enfriar y se desprende la muestra de la lingotera
- Se separa la escoria del régulo fracturando la misma con un martillo
- Se elimina la escoria presente en la superficie del régulo con un martillo
- Se coloca el régulo en una copela precalentada a 960 [°C] por treinta minutos
- Se introduce a la copela en la mufla SEPOR INC. cuya temperatura debe estar fijada a 960 °C
- Una vez que el plomo es absorbido por la copela se retira la de la mufla y se deja enfriar
- Se pesa el doré en un balanza de precisión (Sartorius Research).
- Se ataca el doré con 1 ml de ácido nítrico grado técnico y 1 ml de agua destilada en un tubo de ensayo calentado a baño maría durante 45 minutos con el objetivo de disolver la plata metálica presente. Se utiliza reactivos de grado técnico ya que se está determinando la concentración de metales preciosos
- Se descarta la solución y se realiza tres lavados del precipitado presente en el tubo de ensayo. En cada lavado se utilizan 10 ml de agua destilada.
- Se añade 4 ml de agua regia en el tubo de ensayo y se calienta a baño maría hasta que el oro se disuelva
- Se analiza el contenido de oro en la solución empleando el equipo de espectrofotometría de absorción atómica

En caso de que el doré no adquiera un color negro será necesario realizar un proceso de encuartación, ya que existe una cantidad de oro en el mismo mayor al

25% de su peso. El procedimiento para encuartar al doré se explica a continuación:

- Se descarta la solución de ácido nítrico y agua del tubo de ensayo
- Se realizan tres lavados, cada uno con 20 ml de agua destilada.
- Se extrae al doré del tubo de ensayo y se lo coloca en un crisol de porcelana
- Se seca al doré en una estufa a 110 °C
- Se pesa nuevamente al doré
- Se coloca en una copela pre calentada a 960 °C por treinta minutos el doré, más una cantidad de plata metálica equivalente a tres veces el peso del mismo y una lámina de diez gramos de plomo metálico
- Se introduce a la copela en la mufla y se sigue el mismo procedimiento mencionado anteriormente de ataque con ácido nítrico, lavado y disolución con agua regia

2.2.2.3 Caracterización mineralógica de los concentrados

La caracterización mineralógica de los concentrados polisulfurados se la realizó por difracción de rayos X. los concentrados en polvo son ubicados en las celdas del Difractómetro de rayos X (D8 Advance Bruker).

2.3 ENSAYOS PRELIMINARES DEL USO DE VIDRIO EN LAS OPERACIONES DE FUSIÓN.

Se realiza diversos procesos para que el vidrio se lo utilice de la mejor forma posible como parte de una carga fundente

2.3.1 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA MÁS FAVORABLE PARA LA FUSIÓN

Para un mejor desarrollo de los ensayos de fusión, se realizaron pruebas preliminares para determinar el tamaño de partícula óptimo para fusión, para este cometido se estudió tres tipos de granulometría: 1180 μm , 750 μm < 50 μm . Mediante el siguiente procedimiento:

- Se pesa 30 g del vidrio de las distintas granulometrías anteriormente citadas
- Se coloca las muestras en crisoles cerámicos número 4
- Se colocan los crisoles en la cámara del horno
- Se funde las muestras a 1200°C, durante una hora
- Luego se verifica la fusión en las distintas muestras

2.3.2 ENSAYOS DE FUSIÓN DE VIDRIO CON COMPONENTES DE UNA CARGA FUNDENTE

2.3.2.1 Fusión del vidrio pulverizado con Carbonato de sodio.

Como parte del estudio experimental se realizó pruebas de fusión de vidrio de desecho con componentes de una carga fundente (CO_3Na_2 , Bórax y CaCO_3) para analizar su influencia.

Se fundió el vidrio de desecho con carbonato de sodio, en diferentes adiciones como se detalla a continuación:

- Se pesa 30 g de vidrio pulverizado para los tres diferentes ensayos
- Se combina el vidrio previamente pesado en crisoles cerámicos con adiciones de 30, 20 y 10 g de carbonato de sodio respectivamente
- Se colocan los crisoles en la cámara del horno
- Se funde cada una de las muestras a 1200 °C, durante 1h
- Se verifica la fusión en cada muestra

2.3.2.2 Fusión del vidrio pulverizado con bórax

Al vidrio de desecho previamente pulverizado se fundió con Bórax, adicionando este reactivo en tres diferentes proporciones llevadas a cabo de la siguiente manera:

- Se pesa 30 g de vidrio pulverizado para los tres diferentes ensayos
- Se combina el vidrio previamente pesado en crisoles cerámicos con adiciones de 30, 20 y 10 g de bórax respectivamente
- Se colocan los crisoles en la cámara del horno
- Se funde cada una de las muestras a una temperatura de 1200°C, durante 1h
- Se verifica la fusión en cada muestra

2.3.2.3 Fusión del vidrio pulverizado con carbonato de calcio

Se realizaron fusiones de vidrio con carbonato de calcio según se detalla a continuación:

- Se pesa 30 g de vidrio pulverizado para los tres diferentes ensayos
- Se combina el vidrio previamente pesado en crisoles cerámicos con adiciones de 30, 20 y 10 g de carbonato de calcio respectivamente
- Se colocan los crisoles en la cámara del horno
- Se funde cada uno de las muestras a una temperatura de 1200°C, durante 1h
- Se verifica la fusión en cada muestra

2.3.3 ENSAYOS DE FUSIÓN DE VIDRIO CON CARGAS FUNDENTES EXPERIMENTALES.

Se realizó ensayos al fuego con la carga fundente que fue impuesta empíricamente, para luego metódicamente variar los parámetros de operación y la composición de la carga fundente para optimizar la fusión.

En estos ensayos todavía no se utilizó mineral polisulfurados, El objetivo de estas pruebas es estudiar la viscosidad y homogeneidad de la mezcla fundida en cada carga fundente. Parámetros importantes para asegurar la formación de un régulo de plomo con buena recuperación de los metales preciosos.

Los ensayos efectuados fueron realizados de la siguiente forma:

- Se determina la carga fundente experimental utilizando el vidrio como uno de sus componentes
- Se homogeneiza el vidrio con la carga fundente y se puso en un crisol cerámico
- Se colocan los crisoles con las cargas fundentes en la cámara del horno
- Se realiza las fusiones de cada una de las muestras a una temperatura aproximada de 1200°C, durante 1h
- Se extrae el crisol y se coloca la muestra final en una lingotera metálica con el fin de acumular el régulo en la parte inferior
- Se deja enfriar y se saca la muestra de la lingotera
- Se separa la escoria del régulo fracturando la misma con un martillo
- Se elimina la escoria presente en la superficie del régulo con un martillo
- Se pesa el régulo libre de escoria

2.4 EVALUACIÓN DEL USO DE VIDRIO EN LA FUSIÓN A ESCALA LABORATORIO DE CONCENTRADOS DE PACHIJAL PARA OBTENER MATAS DE COBRE

Se realizaron diversos ensayos con vidrio de desecho presente en la carga fundente para la elaboración de matas de cobre.

2.4.1 PREPARACIÓN DE LA CARGA FUNDENTE PARA LA OBTENCIÓN DE LAS MATAS DE COBRE REFERENCIAL

Para la elaboración de la carga fundente se tendrá que tomar en cuenta las cargas de la experimentación de trabajos anteriores y del múltiple conocimiento de los investigadores del Departamento de Metalurgia Extractiva de la Politécnica Nacional, con la ayuda de dichos ensayos se tomará una directriz para buscar la carga fundente que se desempeñe de mejor forma para nuestro concentrado, de esta manera obtendremos una carga fundente de referencia para obtener la mata que posteriormente nos servirá de blanco para realizar comparaciones con las matas que tendrán vidrio en su composición que irán produciéndose en nuevos ensayos. Para la elaboración de nuestra mata de referencia se seguirán los siguientes pasos:

- Se pesa 30g del concentrado polisulfurado previamente tostado.
- Se pesa 30g del concentrado polisulfurado crudo
- Se pesa 35g de bórax (Tetra borato de Sodio $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)
- Se pesa 60g de carbonato de sodio (Na_2CO_3)
- Se pesa 30g de sílice (SiO_2)
- Se pesa 4g de nitrato de sodio (NaNO_3)
- Se pesa 7g de carbonato de calcio (CaCO_3)

Una vez obtenidas todas estas porciones que son las que constituyen la carga fundente son perfectamente mezcladas y homogeneizadas para luego ser

colocada en un crisol cerámico que será llevado a un horno de crisol para realizar una fusión a 1200°C durante el transcurso de una hora, todos los pasos antes señalados se los realizo en paralelo para poder determinar valores más significativos.

Finalizada la hora de fusión, el crisol es sacado del horno y su contenido vertido en una lingotera de acero como se ve en la figura 20 donde se deja que se enfríe para la posterior remoción de la escoria para obtener nuestra mata de referencia



Figura 20. Fusión vertida en la lingotera de acero.

En la figura 21 se puede observar el material fundido enfriado, para remover la escoria y obtener las matas deseadas.



Figura 21. Matas recién fundidas

Una vez removida toda la escoria la mata es pesada y tanto la mata como la escoria son llevados a un microscopio electrónico de barrido para poder ver sus contenidos de los elementos presentes, en este caso los elementos de nuestro mayor interés son el Cobre y el Hierro.

En la figura 22 se nota un par de matas libres de escoria listas para ser pesadas y ser analizadas para comprobar su contenido de Cobre.



Figura 22. Matas de cobre libres de escoria.

2.4.2 REEMPLAZOS DE SÍLICE POR VIDRIO EN LA CARGA FUNDENTE PARA LA OBTENCIÓN DE MATAS DE COBRE

Se procedió a preparar varios ensayos en los cuales se fue sustituyendo la sílice por el vidrio en las cargas fundentes para la obtención de las matas.

Una vez que se definió la carga fundente de referencia, se procede a variar la carga fundente, de una manera programada se realiza los reemplazos del vidrio por la sílice de la siguiente manera:

- Se realiza la sustitución de la sílice por el vidrio, de manera programada de modo que se vaya sustituyendo 10, 20 y 30 g de vidrio por la sílice, de

manera que en el último ensayo se realiza una sustitución total; el resto de la carga fundente se mantiene sin cambio alguno

- Se realizan nuevos ensayos en los que se mantiene constante la cantidad de 10g de sílice y se coloca, 10, 20 y 30 g de vidrio en el orden citado, con el resto de la carga fundente igual que en el ensayo de referencia
- Se realizan pruebas con una cantidad constante de 20 g de sílice, a las cuales se les adhiere 10, 20 y 30 g de vidrio en el orden secuencial y se mantiene el resto de la carga fundente similar a la de referencia
- Todos los ensayos expuestos anteriormente se funden por 1 h a 1200°C
- De todas las fundiciones de los ensayos previstos se obtendrán matas y escorias las cuales tendrán que ser minuciosamente pulidas para ser llevadas a analizar en un microscopio electrónico de barrido, el cual nos dará el porcentaje de los metales de interés que en este caso es Cu y Fe, dichos resultados serán comparados con los resultados de la carga fundente referencial y así se obtendrá resultados de interés

2.4.3 REEMPLAZOS DE CARBONATO DE SODIO POR VIDRIO EN LA CARGA FUNDENTE PARA OBTENER MATAS DE COBRE

Se realiza esta vez la sustitución de Na_2CO_3 por vidrio para encontrar una carga fundente que contenga vidrio de desecho y que se aproxime a las bondades de la carga fundente de referencia.

Las sustituciones se las desarrollaron de la siguiente manera:

- Se realiza la sustitución del Na_2CO_3 por vidrio, en adiciones de vidrio de 10, 20, 30 y 40 g por Na_2CO_3 , de manera que en el último ensayo se lo haga todavía con un contenido de Na_2CO_3 ya que al ser un reactivo muy importante para la fusión de muestra carga no habría como eliminarlo totalmente de la carga; el resto de la carga fundente se mantiene sin cambio alguno
- Se realiza ensayos en los que se mantiene en todos ellos constante una cantidad de 60g de Na_2CO_3 y se va coloca, 40, 50 y 60 g de vidrio en el

orden citado, con el resto de la carga fundente igual que en el ensayo de referencia citado en la sección 2.3.1.

- Todos los ensayos expuestos anteriormente son llevados al horno de fusión en el cual se funde por una hora a 1200°C
- De todas las fundiciones de los ensayos previstos se obtendrán matas y escorias las cuales tendrán que ser minuciosamente pulidas para ser llevadas a analizar en un microscopio electrónico de barrido, el cual nos dará el porcentaje de los metales de interés que en este caso es Cu y Fe, dichos resultados serán comparados con los resultados de la carga fundente referencial y así se obtendrá resultados de interés
- De los resultados que se obtienen se realizaran nuevos ensayos para elaborar una carga fundente acorde a nuestras necesidades y que llegue a acercarse a los rendimientos de la carga fundente referencial

2.4.4 ENSAYO SIN LA PRESENCIA DE NITRATO DE SODIO EN LA CARGA FUNDENTE PARA OBTENER MATAS DE COBRE

Se realiza un ensayo sin la presencia del nitrato de sodio en la carga fundente para mirar el efecto que se da en la fusión sin este elemento de la carga, para el fin consiguiente empleamos la misma carga referencial que se ha estado utilizando como patrón a lo largo de toda esta tesis y se suprime el nitrato de sodio, la mencionada carga es llevada al horno de crisol y es fundida aproximadamente por una hora a 1200 °C.

2.5 EVALUACIÓN DEL USO DE VIDRIO EN LA OBTENCIÓN DE COBRE METÁLICO A ESCALA LABORATORIO A PARTIR DEL CONCENTRADO DE PACHIJAL

Se realizan diversos con vidrio de desecho presente en la carga fundente para la obtención de cobre metálico utilizando el concentrado polisulfurado de Pachijal.

2.5.1 ENSAYO PARA LA OBTENCIÓN DE COBRE METÁLICO SIN LA PRESENCIA DE VIDRIO EN LA FUSIÓN DE MATAS DE COBRE

Se realizan ensayos para obtener cobre metálico sin el uso de vidrio.

2.5.1.1 ELABORACIÓN DE MATAS SIN PRESENCIA DE VIDRIO

Para realizar los siguientes ensayos se debe preparar una carga fundente para la elaboración de las matas, dicha carga fundente y su preparación ya fue mencionada en la sección 2.4.1 de esta tesis. Con la carga preparada homogeneizamos sus componentes y colocamos en un crisol, el mismo que será introducido en el horno y se fundirá por 1 hora a temperatura 1200°C, una vez que haya transcurrido el tiempo, el producto de la fusión es colado en una lingotera cónica donde dejaremos un tiempo prudente para que se separen las fases y se pueda enfriar para su separación. Luego que se haya dejado enfriar, cuidadosamente se retira los sulfatos que recubren a la mata y con suaves golpes tratamos de desprender a la mata de la escoria, una vez que se haya removido toda la escoria la mata es pesada.

2.5.1.2 FUSIONES DE LAS MATAS DE COBRE PARA LA OBTENCIÓN DE METAL BLANCO

Una vez que se obtiene las matas de Cu, que dicho sea de paso se trabaja en paralelo, estas serán fundidas con la siguiente carga fundente:

- Se pesa 20 g de bórax (Tetra borato de sodio $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)
- Se pesa 30 g de carbonato de sodio (Na_2CO_3)
- Se pesa 10 g de sílice (SiO_2)
- Se pesa 7g carbón (C)

Una vez preparados todos los reactivos de la carga se homogeneiza y se lleva a un crisol cerámico y se coloca en un horno a una temperatura de 1200°C por el lapso de 1 h, luego de transcurrido el tiempo programado el contenido del crisol es nuevamente colado en una lingotera cónica y es dejado allí por unos minutos para que se asienten las fases de la mejor manera y se enfríe la fusión para poder descargar de la lingotera. Cuando se pueda manipular el producto de la fusión se procederá a remover la escoria para obtener el metal blanco.

2.5.1.3 FUSIÓN DEL METAL BLANCO PARA LA OBTENCIÓN DE COBRE METÁLICO

El metal blanco se funde con la siguiente carga fundente:

- Se pesa 20 g de bórax (Tetra borato de sodio $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)
- Se pesa 30 g de carbonato de sodio (Na_2CO_3)
- Se pesa 20g de sílice (SiO_2)

Esta carga se homogeneizó y se coloca conjuntamente con el metal blanco obtenido de la fusión anterior, en un crisol y es llevado al horno para realizar la fusión por 1 h a 1200°C. Del producto de la última fusión se debe producir el cobre metálico que se esconda entre la escoria, la cual debe ser removida.

2.5.2 ENSAYO PARA LA OBTENCIÓN DE COBRE METÁLICO USANDO VIDRIO EN LA FUSIÓN DE MATAS

Se realizan ensayos para tratar de obtener un cobre metálico sin utilizar vidrio en la elaboración de matas pero intervendrá en la carga para fundir las matas para obtener el metal blanco y para la obtención del Cu metálico.

2.5.2.1 ELABORACIÓN DE LAS MATAS DE COBRE

Se debe preparar una carga fundente para la elaboración de las matas, dicha carga fundente y su preparación ya fue mencionada en la sección 2.4.1 de esta tesis. Se homogeneizó sus componentes y son colocados en un crisol, el que se introducirá en el horno y se fundirá por 1 hora a temperatura 1200°C, una vez que haya transcurrido el tiempo, el producto de la fusión es colado en una lingotera cónica donde dejaremos un tiempo prudente para que se separen las fases y se pueda enfriar para una buena separación. Luego que se haya dejado enfriar, cuidadosamente se retira los sulfatos que recubren a la mata y con suaves golpes tratamos de desprender a la mata de la escoria, una vez que se haya removido toda la escoria la mata es pesada.

2.5.2.2 FUSIONES DE LAS MATAS DE COBRE PARA LA OBTENCIÓN DE METAL BLANCO

Estando preparadas las matas, que serán trabajadas en paralelo, estas serán fundidas con la siguiente carga fundente:

- Se pesa 20 g de bórax (Tetra borato de sodio $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)
- Se pesa 50g de carbonato de sodio (Na_2CO_3)
- Se pesa 20g de sílice (SiO_2)
- Se pesa 10g de vidrio
- Se pesa 4 g de nitrato de sodio (NaNO_3)

Una vez preparados todos los reactivos de la carga se homogeneiza y es llevada a un crisol cerámico y colocada en un horno a una temperatura de 1200°C por el lapso de 1 h, luego de transcurrido el tiempo programado el contenido del crisol es nuevamente colado en una lingotera cónica y es dejado allí por unos minutos para que se asienten las fases de la mejor manera y se enfríe la fusión para poder descargar de la lingotera. Cuando se pueda manipular el producto de la fusión se procederá a remover la escoria de un metal blanco que es la antesala a la obtención del cobre metálico.

2.5.2.3 FUSIÓN DEL METAL BLANCO PARA LA OBTENCIÓN DE COBRE METÁLICO

El mencionado metal blanco necesitara ser fundido de nuevo con una nueva carga fundente que se la constituye de la siguiente manera

- Se pesa 20 g de bórax (Tetra borato de sodio $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)
- Se pesa 50g de carbonato de sodio (Na_2CO_3)
- Se pesa 20g de sílice (SiO_2)
- Se pesa 10 g de vidrio
- Se pesa 4 g de nitrato de sodio (NaNO_3)

La mencionada carga se la homogeneiza y se la pone conjuntamente con el metal blanco obtenido de la fusión anterior en un crisol y es llevado nuevamente al horno para realizar nuevamente una fusión por el transcurso de 1 hora a 1200°C . Del producto de la ultima fusión se recupera cobre metálico que se esconda entre la escoria, la cual deberá ser removida.

2.5.3 ENSAYO PARA LA OBTENCIÓN DE COBRE METÁLICO USANDO VIDRIO TANTO EN LA ELABORACIÓN DE MATAS COMO EN LA FUSIÓN DE LAS MISMAS

2.5.3.1 PREPARACIÓN Y FUSIÓN DE LA CARGA FUNDENTE PARA LA OBTENCIÓN DE MATAS DE COBRE USANDO VIDRIO EN SU COMPOSICIÓN

Para la elaboración de las cargas fundentes para estos nuevos ensayos se ha diferido de la producción de las cargas que se han mencionado en las secciones pasadas de esta tesis, estos nuevos ensayos se los ha realizado de una manera que se emplee el vidrio de desecho tanto en la composición de la carga para la mata tanto como de la carga para la fusión de la mata y el refinamiento del metal blanco y además se usa un poco mas de concentrado para ver si de esta manera

se favorece a la formación del cobre metálico. Para la elaboración de nuestras matas se seguirán los siguientes pasos:

- Se pesa 100 g del concentrado polisulfurado previamente tostado.
- Se pesa 50g del concentrado polisulfurado crudo.
- Se pesa 50 g de bórax (Tetra borato de Sodio $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)
- Se pesa 100g de vidrio
- Se pesa 150 g de carbonato de sodio (Na_2CO_3)
- Se pesa 20 g de carbonato de calcio (CaCO_3)



Figura 23. Carga fundente antes de ser homogenizada

Una vez obtenidas todas estas porciones que son las que constituyen la carga fundente como se ve en la figura 23, son mezcladas y homogenizadas para luego ser colocada en un crisol de grafito como se observa en la figura 24, que se lleva a un horno de crisol para realizar una fusión a 1300°C durante el transcurso de 2 h, todos los pasos antes señalados se los realizó en paralelo para poder determinar valores más significativos.



Figura 24. Carga fundente colocada en un crisol de grafito

Finalizada la fusión, el crisol es sacado del horno y su contenido vertido en una lingotera de acero como se puede ver en la figura 25 y 26, donde se deja que repose y formen las fases.

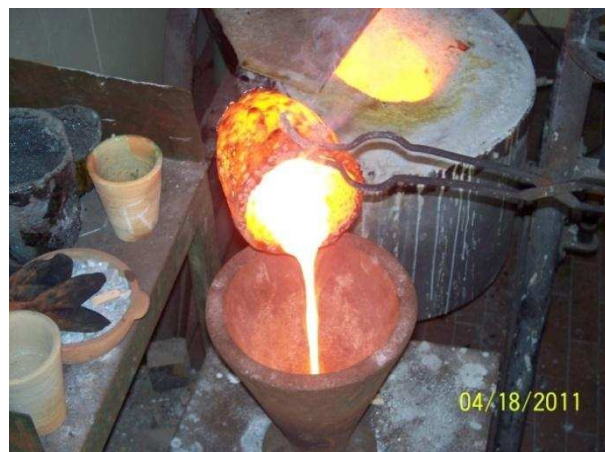


Figura 25. Colado del producto de la fusión en una lingotera de fundición de hierro.



Figura 26. Producto de la fusión reposando en la lingotera de fundición de hierro.

Una vez que se haya enfriado y se haya marcado bien las fases del producto de la fusión, se procede a vaciar la lingotera para obtener la mata cubierta de escoria como se puede ver en la figura 27.



Figura 27. Mata de cobre cubierta de escoria.

Se quiebra cuidadosamente la escoria para poder obtener la mata sin que se produzcan pérdidas por fraccionamiento como se puede apreciar en la figura 28.



Figura 28. Escoria que recubre una mata de cobre.

Una vez que se ha removido toda la escoria posible se obtendrá la mata como se puede mirar en la figura 29, se pesa y está lista para los ensayos posteriores.



Figura 29. Mata de cobre libre de escoria

2.5.3.2 FUSIONES DE LAS MATAS DE COBRE PARA LA OBTENCIÓN DE METAL BLANCO.

Una vez que se obtiene la mata de Cu estas se las funden con la siguiente carga fundente:

- Se pesa 20 g de bórax (Tetra borato de sodio $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)
- Se pesa 20g de carbonato de sodio (Na_2CO_3)

- Se pesa 60 g de vidrio
- Se pesa 10g de carbonato de calcio (CaCO_3)
- Se pesa 5 g de nitrato de potasio (KNO_3)

Una vez preparados todos los reactivos de la carga se homogeneiza y es llevado a un crisol cerámico junto con la mata y puesto en un horno a una temperatura superior a 1300°C por el lapso de una hora, luego de transcurrido el tiempo programado el contenido del crisol es nuevamente colado en una lingotera cónica de acero y es dejado allí por unos minutos para que se asienten las fases y se enfríe la fusión para poder descargar de la lingotera. Cuando se pueda manipular el producto de la fusión se procederá a remover la escoria para obtener el metal blanco que se puede ver en la figura 30.



Figura 30. Metal blanco

2.5.3.3 FUSIÓN DEL METAL BLANCO PARA LA OBTENCIÓN DE COBRE METÁLICO

Una vez que se obtiene el metal blanco se necesita realizar una nueva fusión con la siguiente carga fundente:

- Se pesó 20g de bórax (Tetra borato de sodio $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)
- Se pesó 40 g de carbonato de sodio (Na_2CO_3)
- Se pesó 100 g de vidrio

- Se pesó 10g de carbonato de calcio (CaCO_3)
- Se pesó 5 g de nitrato de potasio (KNO_3)

Una vez preparados todos los reactivos de la carga se homogeneiza y es llevada a un crisol cerámico junto con el metal blanco y puesto en un horno a una temperatura superior a 1300°C por el lapso de dos horas, luego de transcurrido el tiempo designado el contenido del crisol es nuevamente colado en una lingotera cónica de acero y es dejado allí por unos minutos para que se asienten las fases y se enfríe la fusión para poder sacar de la lingotera. Cuando se pueda manipular el producto de la fusión se procederá a remover la escoria para verificar la aparición del cobre metálico.

2.6 EVALUACIÓN DEL USO DE VIDRIO EN LAS OPERACIONES DE FUSIÓN A ESCALA LABORATORIO DE CONCENTRADOS DE PACTO PARA RECUPERACIÓN DE ORO Y PLATA

Se realizaran ensayos al fuego para la recuperación de metales preciosos, utilizando cargas fundentes que tienen vidrio de desecho presente.

2.6.1 ENSAYO DE RECUPERACIÓN DE ORO Y PLATA REFERENCIAL

Para elaborar el ensayo referencial, comenzamos por obtener una carga que este acorde a la buena recuperación de los metales de interés, para esto se toma en cuenta las cargas de la experimentación de trabajos anteriores y del múltiple conocimiento de los investigadores del departamento de metalurgia extractiva de la Politécnica Nacional, basándose en dichos ensayos se tomara una directriz para buscar la carga fundente que se desempeñe de mejor forma para el concentrado, de esta manera se obtendrá la carga fundente de referencia para obtener los valores de recuperación del Au y Ag que posteriormente servirá de

blanco para realizar comparaciones con los próximos ensayos que tendrán vidrio en su composición. Para la elaboración de la carga fundente de referencia se seguirán los siguientes pasos:

- Se pesa 30 g del concentrado polisulfurado previamente tostado.
- Se pesa 30g de bórax (Tetra borato de Sodio $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)
- Se pesa 40 g de carbonato de sodio (Na_2CO_3)
- Se pesa 40g de litargirio (PbO)
- Se pesa 40 g de carbonato de sodio (Na_2CO_3)
- Se pesa 7 g de carbonato de calcio (CaCO_3)
- Se pesa 2g de carbón (C)

Una vez obtenidas todas estas porciones, que son las que constituyen la carga fundente, son mezcladas y homogeneizadas para luego ser colocadas en un crisol cerámico que se lo llevará al horno de crisol para realizar la fusión a 1200°C durante el transcurso de 1 h, todos los pasos antes señalados se los realizó en paralelo para determinar valores más significativos.

Finalizada 1 h de fusión, el crisol es sacado del horno y su contenido vertido en una lingotera de acero como se ve en la figura 31, donde dejaremos que se enfríe para la posterior remoción de la escoria para obtener nuestro régulo de referencia



Figura 31. Vertido del producto fundido.

Una vez que se pueda manipular el régulo de plomo, este es golpeado para desalojar cualquier rastro de escoria, este régulo que se lo golpea y se le ha dado una forma cubica es puesto en una copela que estará previamente seca y se la introduce en la mufla a aproximadamente 960°C como se puede apreciar en la figura 32, en este proceso se separa los metales preciosos del plomo de manera que el plomo se oxida y el resto del plomo que se ha fusionado se absorbe en la copela.

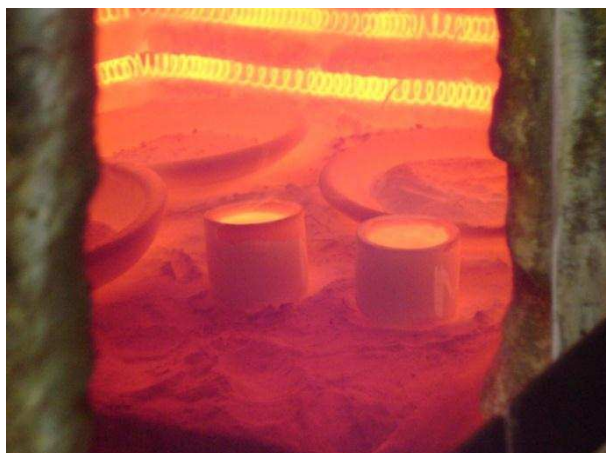


Figura 32. Copelación de un régulo de Pb que contiene Au y Ag.

Una vez libres los metales preciosos de el plomo, se saca la copela de la mufla y se deja enfriar para poder obtener un dore que se lo puede apreciar en la figura 33, que no es más que una mezcla de oro y plata.



Figura 33. Doré de Au y Ag

El doré obtenido se lo introduce en un tubo de ensayo donde se colocara 1ml de agua y 1 ml de ácido nítrico, se calienta para acelerar la formación del nitrato de plata, así dejando al oro solo, se remueve el nitrato de plata y el contenido de oro es colocado en un crisol de níquel que se lo introduce nuevamente en la mufla alrededor de 5 min, luego de transcurrido este tiempo, el crisol es sacado de la mufla, se deja enfriar y se pesa el contenido de oro metálico y por diferencia en el peso del dore, tendremos el peso de la plata.

2.6.2 REEMPLAZOS DE VIDRIO BÓRAX EN LA CARGA FUNDENTE PARA OBTENER ORO Y PLATA

Se prepara varios ensayos en los cuales se irá sustituyendo el vidrio por el bórax en las cargas fundentes para la obtención de un régulo de plomo.

Una vez que se definió la carga fundente de referencia, se procede a variar la carga fundente, de una manera programada se realiza los reemplazos del vidrio por el bórax de la siguiente manera:

- Se realizó la sustitución del vidrio por el bórax, de manera programada de modo que se vaya sustituyendo 10, 20 y 30 g de vidrio por el bórax, de manera que en el último ensayo se realiza una sustitución total; el resto de la carga fundente se mantiene sin cambio alguno.
- En todos los ensayos expuestos anteriormente fueron llevados al horno de fusión en el cual se funde por una hora a 1200°C
- De todas las fundiciones de los ensayos previstos se obtuvieron régulos de plomo los cuales fueron golpeados para una total remoción de la escoria.
- Los régulos de plomo se los someterá a copelación en una mufla a 960°C para obtener un dore.
- Se atacó el dore con HNO_3 para desprender a la plata del oro en forma de AgNO_3

- La solución de nitrato de plata se analizó por absorción atómica o en su defecto se tomó el residuo de oro bien seco y se pesó y así se obtuvo el valor de la composición de oro y plata

2.6.3 REEMPLAZOS DE VIDRIO POR CARBONATO DE SODIO EN LA CARGA FUNDENTE PARA OBTENER ORO Y PLATA

Se realizaron ensayos con la sustitución de Na_2CO_3 por vidrio en las cargas fundentes, para la obtención de régulos de plomo que contenga los metales preciosos.

Las sustituciones se las desarrollaron de la siguiente manera:

- Se realizaron la sustitución del vidrio por Na_2CO_3 , en adiciones de vidrio de modo que se vaya sustituyendo 10, 20, 30 y 40 g de vidrio por Na_2CO_3 , de manera que en el último ensayo se lo haga todavía con un contenido de Na_2CO_3 ya que al ser un reactivo muy importante para la fusión de muestra carga no habría como eliminarlo totalmente de la carga; el resto de la carga fundente se mantiene sin cambio alguno.
- Se realiza ensayos en los se va alterando la composición de Na_2CO_3 y del vidrio, para verificar algunos ensayos de prueba y error.
- En todos los ensayos expuestos anteriormente son llevados al horno de fusión en el cual se funde por una hora a 1200°C
- De todas las fundiciones de los ensayos previstos se obtendrán régulos de plomo los cuales tendrán que ser golpeados para una total remoción de la escoria.
- Los régulos de plomo se los someterá a copelación en una mufla a 960°C para obtener un doré.
- Se ataca el doré con HNO_3 para desprender a la plata del oro en forma de AgNO_3

- La solución de nitrato de plata se analiza por absorción atómica o en su defecto se toma el residuo de oro bien seco y se pesa y así se tendrá la composición de oro y plata

2.6.4 USO DE DIFERENTES CLASES DE VIDRIO EN LA CARGA FUNDENTE PARA OBTENER ORO Y PLATA

Una vez que se obtenga una carga con un buen porcentaje de recuperación de los metales de interés se realiza pruebas con diferentes tipos de vidrio, en este caso por tratarse de ensayos con botellas de vidrio se realizara pruebas con desechos de botellas de vidrio blanco, ámbar y verde manteniendo constante el resto de la composición de la carga fundente para que y así se realizara los análisis para ver el contenido de de oro y plata.

2.7 CARACTERIZACIÓN DE LA CARGA FUNDENTE EN UN SISTEMA TERNARIO B_2O_3 - Na_2O - SiO_2

Para el desarrollo del presente estudio se determina la cantidad de B_2O_3 , Na_2O y SiO_2 presentes en el concentrado polisulfurado como en la carga fundente. Para esto se debe analizar químicamente los concentrados y cuantificar los compuestos presentes.

A continuación se detalla la forma de proceder para ubicar los compuestos deseados en el diagrama ternario.

- Se calculó el aporte de SiO_2 del concentrado
- Se adicionó la cantidad de SiO_2 presente en la carga fundente
- Se calculó la cantidad de Na_2O generada por la reacción de descomposición del Na_2CO_3 presente en la carga fundente

- Se calculó la cantidad presente de B_2O_3 producto de la descomposición del $Na_2B_4O_7$ presente en la carga fundente
- Se calculó los porcentajes de cada uno de los elementos que intervendrán en el diagrama ternario.

Una vez que se concluye el mencionado procedimiento se ubica las composiciones en el diagrama ternario.

2.8 EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL USO DE LOS DESECHOS DE VIDRIO EN LAS OPERACIONES DE FUSIÓN

Una vez que se defina las cargas fundentes con vidrio de desecho en su composición que presenten las mejores recuperaciones se realiza una comparación en costos entre la carga con vidrio en su composición y la carga fundente que se usa de referencia en cada uno de los casos para el mineral de Pachijal y el de Pacto

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS CONCENTRADOS POLISULFURADOS DE PACHIJAL Y PACTO Y DE LOS DESECHOS DE VIDRIO.

Se caracterizó los concentrados polisulfurados correspondientes a las minas de Pacto y Pachijal y el desecho de vidrio de botellas para determinar las condiciones iniciales y poder establecer el o los procesos a emplear en el tratamiento de estos materiales.

3.1.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS DESECHOS DE VIDRIO

El análisis granulométrico fue realizado a través de la metodología experimental descrita en la sección 2.2.1.4, de modo que se determinaron los parámetros descritos en la tabla 4 Los detalles de este ensayo se hallan en Anexo I.

Tabla 6.d80 para el vidrio de desecho.

Muestra	Parámetro	Valor	Unidad
Desecho de vidrio	d_{80}	1154	(μm)

El residuo de vidrio proveniente del consumismo de la ciudad, presentan un d_{80} de 1154 μm , lo que indica que el 80 % del material presenta un tamaño menor o igual a este valor. La importancia de definir este parámetro, es que la rapidez de la fusión del vidrio depende del tamaño de partícula, pues a menor tamaño de partícula el tiempo de fusión disminuye. En este caso al tratarse de una granulometría muy fina, este desecho de vidrio se fundirá con facilidad

3.1.2 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE RESIDUO DEL VIDRIO Y DE LOS CONCENTRADOS POLISULFURADOS

La determinación de la densidad fue realizada por medio de la metodología experimental descrita en la sección 2.2.2.1, de modo que se determinaron los parámetros descritos en la tabla 7.

Tabla 7. Densidad real y aparente, del vidrio de desecho y concentrados polisulfurados.

Compuesto	Densidad real (g/ml)	densidad aparente (g/ml)
Desecho de vidrio	2,82	1,15
Concentrado de Pachijal	2,76	1,66
Concentrado de Pacto	2,39	0,95

Los residuos de vidrio presentaron una densidad real 2,82 g/ml La relación entre la densidad aparente y la densidad real fue 2,45g/ml lo que indica que el 2,45 % del espacio ocupado por el residuo corresponde a un espacio libre. Por tanto se caracteriza al residuo de vidrio del proceso como un material compacto.

3.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS CONCENTRADOS POLISULFURADOS Y DEL VIDRIO DE DESECHO

3.2.1 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES EN LOS CONCENTRADOS DE PACHIJAL Y PACTO

La metodología experimental descrita en la sección 2.2.2.2, se empleó para determinar la concentración de metales pesados.

En la tabla 8, se presenta los resultados del contenido metálico del concentrado polisulfurado de Pacto, determinados por absorción atómica.

Tabla 8.Concentración de metales pesados en el concentrado polisulfurado de Pacto.

Elemento	Contenido (Wt %)
Cu	1,32
Fe	5,45
Pb	3,48
Zn	4,00
Ca	0,49
Mg	0,50
Al	2,35
Na	15,1
K	1,69

De los resultados arrojados por las pruebas de absorción atómica podemos ver que hay una presencia importante de metales pesados como el Cu, Fe, Pb, Zn y Al, que pueden dar buenos réditos.

Por otra parte para la determinación de oro y plata se realizo el ensayo al fuego utilizando la carga fundente presentada en la tabla 9, dicha composición de carga fundente se la utilizo tanto para el concentrado de Pacto como para el de Pachijal.

Tabla 9.Carga fundente utilizada para el ensayo al fuego para la determinación de oro y plata

Reactivo	Peso (g)
Bórax	30
Na ₂ CO ₃	40
PbO	40
CaCo3	7
C	2

Se determinó las siguientes composiciones presentadas en la tabla 10, donde se puede ver que se trata de valores muy altos en sus porcentajes ya que se trata de un material que ya fue previamente concentrado por flotación.

Tabla 10.Contenido de Au y Ag en el concentrado de Pacto

Elemento	Contenido (g/TM)
Au	369,67
Ag	1822,51

En la tabla 11 se presentan los resultados del contenido metálico del concentrado polisulfurado de Pachijal, determinados por absorción atómica.

Tabla 11.Concentración de metales pesados en el concentrado polisulfurado de Pachijal

Elemento	Contenido (Wt %)
Cu	30,24
Fe	28,55
Pb	6,80
Zn	4,65
Ca	0,03
Mg	0,13
Al	0,49
Na	13,15
K	1,49

En dichos resultados podemos ver que hay una marcada predominación del Cu y el Fe, es por eso que con estos resultados podemos ver que será un buen material para la elaboración de matas de cobre que su composición fundamental son los sulfuros de cobre y hierro.

También se realizó el debido ensayo al fuego para determinar el contenido de Au y Ag que se presenta a continuación en la tabla 12, donde se puede ver que aun siendo este un concentrado eminentemente de Cu hay una cantidad representativa de Au y Ag.

Tabla 12.Contenido de Au y Ag en el concentrado de Pachijal

Elemento	contenido (g/TM)
Au	53,32
Ag	245,29

3.2.2 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LOS CONCENTRADOS

La determinación de los compuestos con cristalización definida presentes en la muestra se realizó empleando el Difractómetro D8 ADVANCE, el programa Difracc plus para cualificación y cuantificación.

La difracción de rayos X permite determinar los compuestos y aleaciones presentes en las muestras de los concentrados polisulfurados, los mismos que se indica en la tabla 13. Para realizar este ensayo, se empleó la metodología descrita en la sección 2.1.2.3.

Tabla 13.Análisis de difracción de rayos X del concentrado polisulfurado de la mina de Pachijal.

Mineral	Formula	Contenido (Wt %)
Calcopirita	CuFeS_2	68
Coesita	SiO_2	5
Pirita	FeS_2	10
Esfalerita	ZnS	3
Cuarzo	SiO_2	4
Grupo Plagioclasa	$(\text{Maca})\text{Al}(\text{Si}, \text{Al})\text{Si}_2\text{O}_8$	5
Natrolita	$\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2
Caolinita	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	3

En los resultados presentados en la tabla 13, podemos apreciar que hay una alto contenido de Calcopirita la que alberga una cantidad muy importante de Cu en su composición, en menor porcentaje pero no menos importante hay una presencia alta de pirita con su composición de Fe, este análisis comprueba los resultados de

la tabla 11 donde muestra altísimos contenidos en porcentaje de Cu y Fe en el concentrado polisulfurado de Pachijal.

Tabla 14. Análisis de difracción de rayos X del concentrado polisulfurado de la mina de Pacto

Mineral	Formula	Contenido (Wt %)
Cuarzo	SiO ₂	79
Caolinita	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	7
Pirita	FeS ₂	6
Calcopirita	CuFeS ₂	1
Muscovita	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂	2
Calcita	CaCO ₃	2
Galena	PbS	2
Esfalerita	ZnS	1

Los resultados expuestos en la tabla 14, nos indica los compuestos presentes en el concentrado polisulfurado de la mina de pacto donde se puede ver un alto contenido Cuarzo el cual puede estar acoplado a otros compuestos presentes en el concentrado, en los mismo que puede formar parte Au y la Ag, también se ve una importante presencia de sulfuros de Fe y Cu como son la Pirita y calcopirita que también pueden ser estos compuestos los que contengan Au y Ag.

De este análisis se verá que la cantidad alta del cuarzo será beneficiosa en el momento de la fusión.

Hay que aclarar que los análisis por difracción de rayos x solo se los puede realizar para compuestos cristalinos, debido a esa causa no hemos podido realizar este tipo de análisis al vidrio de desecho por tratarse de un compuesto no cristalino, amorfo.

3.2.3 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL VIDRIO DE DESECHO POR MEDIO DEL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO

Una de las grandes ventajas de la microscopía electrónica de barrido es que al estar integrado con equipos de microanálisis, lo cual permite determinar la naturaleza química de partículas a nivel microscópico.

Para la caracterización química de los desechos de vidrio, se realizó un análisis químico elemental, mediante el microscopio electrónico Tescan, como se especificó en la sección 2.2.2.2. En diferentes secciones del residuo de vidrio se analizaron los siguientes elementos: silicio, calcio, aluminio, magnesio, sodio y oxígeno.

Tabla 15. Análisis de residuos de vidrio mediante microscopía electrónica

Elemento	Composición (Wt %)
Silicio	30,91
Calcio	9,34
Aluminio	1,26
Magnesio	0,61
Sodio	10,74
Oxígeno	47,14

De los resultados obtenidos, presentados en la tabla 15, claramente podemos ver que el componente principal es el silicio y el oxígeno lo cual es muy importante ya que uno de los fines de esta tesis es el reemplazo de la sílice por el vidrio en las operaciones de fusión.

Hay que rescatar que esta forma de análisis fue la más veraz para la cuantificación de los elementos presentes en el vidrio, primero por tratarse de un compuesto amorfo no se puede cuantificar por difracción de rayos X y segundo debido a que podemos ver que en la muestra hay una presencia mayoritaria de sílice que es un compuesto casi insoluble, con otras técnicas empleadas no se dio

los resultados esperados, en cambio con las bondades de la microscopia electrónica no fue difícil analizar su composición.

3.3 ENSAYOS PRELIMINARES DEL USO DE VIDRIO EN LAS OPERACIONES DE FUSIÓN

3.3.1 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA MÁS FAVORABLE PARA LA FUSIÓN

En esta etapa de nuestra investigación se han realizado ensayos preliminares usando el vidrio, en este caso hemos fundido al vidrio sin ningún tipo de reactivo y a diferentes granulometrías y vemos el tiempo en que se funde como podemos apreciar en la tabla 16.

Tabla 16. Fusión de vidrio a diferentes granulometrías

Peso (g)	Temperatura (°C)	Tiempo de fusión (min)	Abertura de Malla (um)
30	1200	45	50
30	1200	60	750
30	1200	120	1180

En la figura 34, podemos ver claramente que cuando aumenta el diámetro de partícula aumenta el tiempo de fusión del vidrio, lo que no conviene para ensayos posteriores, debido a que el incremento del tiempo de fusión significa costos de operación, o en su caso para reducir el costo de fusión tendríamos que utilizar más reactivos, es por eso que se debe trabajar en la fusión con el tamaño de partícula más pequeño que se disponga, en este caso el mejor tiempo que podemos apreciar es el de 1 180um que es el material pulverizado.

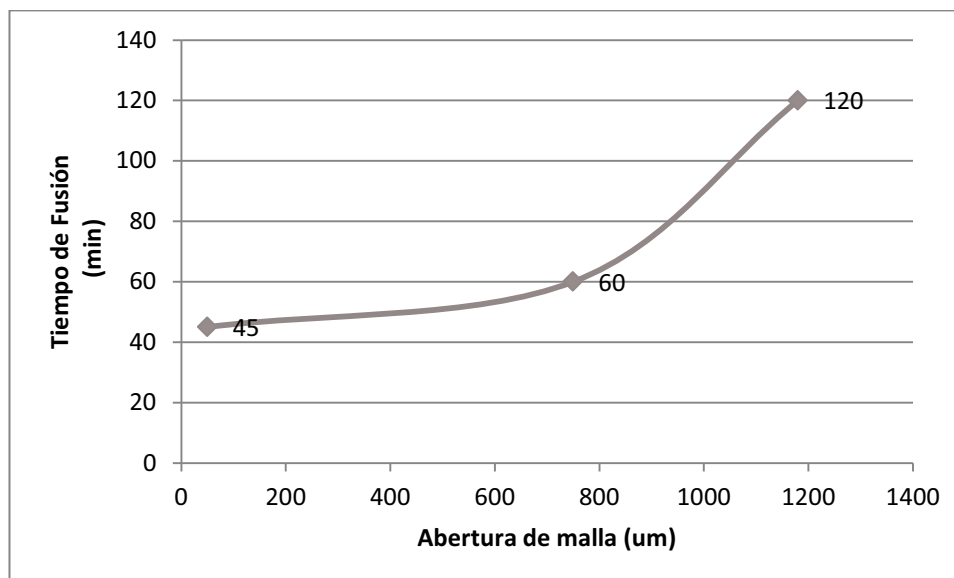


Figura 34. Fusión de vidrio sin reactivo en función del tiempo

3.3.2 FUSIÓN DE LA MEZCLA VIDRIO CON CARBONATO DE SODIO.

En el ámbito de realizar pruebas de prueba y error hemos fundido una porción determinada de vidrio pulverizado con distintas porciones de carbonato de sodio y luego del transcurso de 1 h de fusión a 1 200°C observamos cual ha sido el aporte que ha dado cada porción de carbonato de sodio en la fusión del vidrio, dichos resultados los podemos apreciar en la tabla 17.

Tabla 17. Fusión de vidrio con diferentes porciones de CO_3Na_2 por 1h a 1200°C

Muestra	Vidrio Peso (g)	CO_3Na_2 (g)	Nota
1	30	30	No se funde
2	30	20	Algo se funde
2	30	10	No se funde bien

De la experiencia realizada podemos comentar que el carbonato de sodio solo, como componente fundente no ayuda a una pronta fusión del vidrio, ya que tratándose de un fundente básico ayudara a la formación de silicatos que serán parte de una escoria

3.3.3 FUSIÓN DELA MEZCLA VIDRIO CON BÓRAX

Siguiendo con la experimentación de fundir al vidrio con cada uno de los componentes fundentes, esta vez se ha fundido el vidrio pulverizado con distintas porciones de bórax por el transcurso de 1 h a 1 200°C de temperatura, los resultados podemos revisarlos en el contenido de la tabla 18.

Tabla 18.Fusión de vidrio con diferentes porciones de Bórax por 1h a 1200°C

Muestra	Vidrio Peso (g)	Bórax (g)	Nota
1	30	30	Se funde
2	30	20	Se funde
2	30	10	Se funde

Los ensayos realizados nos demuestran que al ser el bórax un buen fundente con una temperatura de fusión relativamente baja, ayuda a que el vidrio pueda fundirse sin el menor problema, pero si se puede decir que hubo cierto problema en el colado ya que las muestras se tornaron muy viscosas.

3.3.4 FUSIÓN DELA MEZCLA VIDRIO CON CARBONATO DE CALCIO

En esta ocasión hemos fundido una porción determinada de vidrio pulverizado con distintas porciones de carbonato de calcio y luego del transcurso de una hora de fusión a 1 200°C observamos cual ha sido el aporte que ha dado cada porción de carbonato de calcio en la fusión del vidrio, dichos resultados los podemos apreciar en la tabla 19.

Tabla 19.Fusión de vidrio con diferentes porciones de CaCO₃ por 1h a 1200°C

Muestra	Vidrio Peso (g)	CaCO ₃ (g)	Nota
1	30	30	No funde
2	30	20	No funde
2	30	10	No funde

De la experiencia realizada podemos comentar que el carbonato de calcio solo, como componente fundente no ayuda a una pronta fusión del vidrio.

3.3.5 ENSAYOS DE FUSIÓN DE MEZCLAS DE VIDRIO CON CARGAS FUNDENTES EXPERIMENTALES

En estos ensayos se siguen realizando la metodología de prueba y error donde en un principio se escogió una carga fundente al azar y luego se la fue modificando en base a los resultados que se fueron obteniendo, basándonos en cómo se realiza el colado en las lingoteras o en otros casos de cómo se favorece a la formación del régulo de plomo.

En la tabla 20, tenemos los resultados de 3 ensayos que fueron realizados a la par, para poder utilizar la misma temperatura y tiempo de fusión, tres crisoles con sus debidas cargas fundentes fueron puestas en el horno por el transcurso de una hora para ver el comportamiento de la fusión del vidrio de desecho con sus respectivas cargas fundentes, las cuales fueron alteradas en la composición de uno de sus componentes, en este caso el bórax que se fue disminuyendo en una porción de 10 g en cada ensayo, al final de dicho ensayo se pudo ver que la carga con mayor cantidad de bórax produjo el régulo con el peso más alto de los 3 ensayos. También se pudo apreciar que los 3 ensayos funden sin ningún problema, pero cabe recalcar que de los 3 ensayos el segundo es el más fluido y más fácil de colar en la lingotera.

Tabla 20. Ensayos realizados variando la composición del bórax en la carga fundente

Ensayo	1	2	3
Temperatura (°C)	1 200	1 200	1 200
Tiempo (min)	60	60	60
Vidrio (g)	30	30	30
Bórax (g)	30	20	10
Na ₂ CO ₃ (g)	40	40	40
PbO (g)	40	40	40
C (g)	2	2	2
Peso del Régulo (g)	28,6	20,5	18,4

A continuación se presenta en la tabla 21, los pesos de los régulos que se obtuvieron con sus respectivas cargas fundentes al variar la composición del carbonato de sodio en sus cargas fundentes. Los resultados logrados nos demuestran que el decremento en la composición de carbonato de sodio en la carga fundente es directamente proporcional a la disminución del peso del régulo de plomo, lo que no favorecerá en los subsiguientes ensayos con la presencia del concentrado polisulfurado. También se puede notar que a medida que se va minorando la cantidad de carbonato en las cargas esto produce que se produzca un aumento en la viscosidad del fluido aunque todavía es posible verter en las lingoteras.

Tabla 21. Ensayos realizados variando la composición del Na₂CO₃ en la carga fundente

Ensayo	1	2	3	4	5
Temperatura (°C)	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200
Tiempo (min)	60	60	60	60	60
Vidrio (g)	30	30	30	30	3
Bórax (g)	30	20	30	30	30
Na ₂ CO ₃ (g)	40	30	20	10	0
PbO (g)	40	40	40	40	40
C (g)	2	2	2	2	2
Peso del Régulo (g)	29,5	25,2	20,5	15,2	9,8

Seguidamente se presenta los ensayos realizados cambiando la cantidad en peso de carbón en la carga fundente, el cual aunque parecería ilógico al cambiar a penas en un gramo en la composición de la carga afecta de manera sustancial a la formación del régulo, esto lo podemos apreciar en la tabla 22, donde podremos ver que a medida que se va disminuyendo el peso del carbón hasta quitarlo en su totalidad y manteniendo constante el resto de la carga, el peso del régulo disminuye considerablemente.

Tabla 22. Ensayos realizados variando la composición del C en la carga fundente

Ensayo	1	2	3
Temperatura (°C)	1 200	1 200	1 200
Tiempo (min)	60	60	60
Vidrio (g)	30	30	30
Bórax (g)	30	30	30
Na ₂ CO ₃ (g)	40	40	40
PbO (g)	40	40	40
C (g)	2	1	0
Peso del Régulo (g)	29,2	20,1	10,3

Para culminar esta serie de ensayos que se realizó con el vidrio y como se vio que el sector en el que se consigue la materia prima posee diversas clases de vidrio, se realizó ensayos de fusión con los tipos de vidrios de botellas más comunes como son el vidrio blanco, ámbar y verde, los cuales fueron sometidos a fusión con las cargas fundentes que se presentan en la tabla 23, y podemos resaltar que no varía de una manera drástica, se sabe que la composición de los diferentes vidrios de colores se da por la presencia de óxidos y sales de diferentes metales, pero para el caso que conlleva nuestra atención, dicha composición no afecta en los ensayos de fusión. Como se puede ver en los ensayos realizados el peso del régulo de plomo es casi similar en las pruebas realizadas con distintos tipos de vidrios de botellas y su fluidez en el colado es similar en todos los casos.

Tabla 23.Fusión de distintas clases de vidrio con la misma carga fundente

Ensayo	1	2	3
Vidrio	Blanco	Ámbar	Verde
Temperatura(°C)	1 200	1 200	1 200
Tiempo(min)	60	60	60
Vidrio(g)	30	30	30
Bórax(g)	30	30	30
Na₂CO₃(g)	40	40	40
PbO(g)	40	40	40
C(g)	2	2	2
Peso del Régulo(g)	29,5	28,8	29,6

3.4 EVALUACIÓN DEL USO DE VIDRIO EN LA FUSIÓN DE CONCENTRADOS DE PACHIJAL PARA OBTENER MATAS DE COBRE

3.4.1 PREPARACIÓN DE LA CARGA FUNDENTE PARA LA OBTENCIÓN DE LAS MATAS DE COBRE REFERENCIAL

Se preparo una carga fundente para tener una referencia de valores para comparar con los siguientes ensayos, se realizo muchos ensayos de los cuales escogimos los que presentaron una mejor fusión, a continuación en la tabla 24, podemos revisar como está conformada nuestra carga fundente que dicho sea de paso se la realizo en paralelo para poder tener un mejor alcance de los datos. También podemos ver al final de la mencionada tabla los valores en peso de las matas de cobre obtenidas

Tabla 24. Cargas fundentes para la obtención de matas de cobre de referencia

CARGA FUNDENTE	1	2
Temperatura (°C)	1 200	1 200
Tiempo (h)	1	1
Concentrado de Cobre Tostado (g)	30	30
Concentrado de Cobre Crudo (g)	30	30
Bórax (g)	35	35
Na₂CO₃(g)	60	60
SiO₂(g)	30	30
NaNO₃(g)	4	4
CaCO₃ (g)	7	7
Peso de Mata (g)	22	22

Una vez que se obtuvo las matas se las llevó a analizar en un microscopio electrónico de barrido (MEB), tanto a las matas como a las escorias. En los resultados antes mencionados vemos que el peso de las matas de cobre tiene en coincidencia el mismo peso, pero solo el análisis por microscopia dirá si tienen una composición similar.

Las matas de cobre en su generalidad están compuestas por sulfuros de hierro y de cobre, pero al realizar el análisis en el MEB se puede notar los metales más relevantes que se presentan a continuación en la tabla 25 donde se puede apreciar que se tiene un alto porcentaje de Cu, se dice que una mata tiene un buen contenido de Cu cuando este está por encima del 40%, en este caso nosotros tenemos una excelente ya que podemos apreciar que el valor promedio de contenido de cobre en las matas es del 50,03% que es un valor muy considerable, el cual se lo tendrá como referencia para ensayos subsiguientes.

El éxito de un ensayo de fusión por mata es el que se pueda mandar a la mayoría del metal de Fe a la fase escoria y que el Cu se quede en la fase mata, en esta prueba se ha analizado el contenido de la escoria en un MEB donde los resultados presentados en la tabla 26, nos muestran que se realizó un buen

trabajo ya que los contenidos de Cu en la escoria son muy bajos y por otro lado tiene un considerable porcentaje de Fe presente en la misma

Tabla 25. Composición química de las matas de cobre de referencia

Mata	1	2
Elemento	Wt %	Wt %
Pb	7,99	3,12
S	14,34	1,27
O	7,85	8,3
Na	5,80	5,11
Fe	<u>5,01</u>	<u>4,82</u>
C	6,91	12,42
Cu	<u>52,10</u>	<u>47,96</u>
Valor promedio Cu	<u>50,03</u>	
Valor promedio Fe	<u>9,92</u>	

Tabla 26. Composición química de las escorias del ensayo de matas de referencia

Escoria	1	2
Elemento	Wt %	Wt %
O	20,31	18,85
Na	29,70	28,13
Fe	<u>19,93</u>	<u>23,19</u>
Si	17,82	16,55
Ca	4,10	4,53
C	1,17	3,84
K	1,52	1,39
S	3,13	1,97
Al	1,47	0,95
Cu	<u>0,84</u>	<u>0,6</u>
Valor promedio Cu	<u>0,72</u>	
Valor promedio Fe	<u>21,56</u>	

3.4.2 REEMPLAZOS DESÍLICE PORVIDRIO EN LA CARGA FUNDENTE PARA LA OBTENCIÓN DE MATAS DE COBRE

El componente que está en mayor cantidad en el vidrio es la Sílice, es por eso que se quiere sustituir la sílice por el vidrio en las operaciones de fusión en este caso en la obtención de matas de cobre.

En los 3 ensayos presentados en la tabla 27, se puede ver las cargas fundentes utilizadas para elaborar matas de cobre con la característica de que se sustituirá gradualmente la sílice por el vidrio hasta una sustitución total, se obtiene de estos ensayos muy buenos pesos de mata que se aproximan bastante al peso de las matas obtenidas en el ensayo referencial.

Tabla 27. Cargas fundentes para la obtención de matas de cobre sustituyendo sílice por vidrio de desecho

CARGA FUNDENTE	1	2	3
Temperatura (°C)	1 200	1 200	1 200
Tiempo (h)	1	1	1
Concentrado de Cobre Tostado (g)	30	30	30
Concentrado de Cobre Crudo (g)	30	30	30
Bórax (g)	35	35	35
SiO₂ (g)	20	10	0
Vidrio (g)	10	20	30
Na₂CO₃(g)	60	60	60
NaNO₃(g)	4	4	4
CaCO₃ (g)	7	7	7
Peso de Mata (g)	22,4	22,0	24,0

Una vez que se obtuvo las matas fueron sometidas a los pertinente análisis de composición en un MEB, dichos análisis arrojaron los datos presentados en la tabla 28, donde se puede apreciar los porcentajes de elementos más trascendentales presentes en la mata, de los elementos de nuestro interés que son el Cu y el Fe para el desarrollo de esta investigación podemos ver que la sustitución de la sílice por el vidrio no altera drásticamente los porcentajes de

recuperación de Cu, se puede decir que se obtiene alrededor del 99% de cobre en relación al ensayo de referencia en la sustitución total, esto se debe a que como habíamos mencionado el vidrio posee una cantidad considerable de sílice en su composición

Tabla 28. Composición química de las matas de cobre sustituyendo sílice por vidrio

Mata	1	2	3
Elemento	Wt %	Wt %	Wt %
Pb	1,96	3,87	4,17
S	17,92	18,73	15,24
O	4,93	5,58	11,69
Na	2,60	5,64	8,21
Fe	3,28	5,18	3,83
C	8,12	9,27	11,19
Cu	61,19	51,73	49,68

La sílice tiene mucho que ver en la formación de la escoria, al formar los silicatos que constituyen esta, en la tabla 29, podemos ver las composiciones de las escorias de los 3 ensayos en los cuales nos podemos dar cuenta que la sustitución de la sílice por vidrio nos da al igual que el ensayo de referencia valores bajos de Cu y valores significativos de Fe.

Otra forma de ver que las escorias se han formado de la manera deseada es su color, ya que en los ensayos realizados se nota un color negro brillante como se puede ver en la Figura 35, en la cual nos indica que no hay presencia excesiva de Cu en la escoria ya que de ser así el color de la escoria se tornaría un tanto rojizo como se puede apreciar en la Figura 36.

Tabla 29. Composición química de las escorias del ensayo de obtención de matas de cobre sustituyendo sílice por vidrio

Escoria	1	2	3
Elemento	Wt %	Wt %	Wt %
O	4,27	16,16	14,14
Na	24,33	32,21	31,37
Fe	17,71	19,08	16,86
C	20,79	5,96	12,57
Si	12,52	14,19	12,41
Ca	4,41	6,10	6,08
Al	2,13	1,33	1,55
K	1,19	1,38	1,52
S	2,11	3,25	3,20
Cu	0,54	0,34	0,29



Figura 35. Escoria de fusión por mata sin concentración excesiva de Cu



Figura 36. Escoria de color rojizo por presencia excesiva de Cu

En los siguientes ensayos se mantiene constante una porción de 10g de sílice y se aumenta el vidrio en porciones de 10g en cada ensayo manteniendo el resto de la carga constante como se manifestó en la sección 2.4.2. en la tabla 30, se describe de mejor manera las cargas fundentes utilizadas en los ensayos y las condiciones de fusión

Tabla 30. Cargas fundentes para la obtención de matas de cobre sustituyendo sílice por vidrio manteniendo 10 g constantes de sílice

CARGA FUNDENTE	1	2	3
Temperatura (°C)	1 200	1 200	1 200
Tiempo (h)	1	1	1
Concentrado de Cobre Tostado (g)	30	30	30
Concentrado de Cobre Crudo (g)	30	30	30
Bórax (g)	35	35	35
SiO₂ (g)	10	10	10
Vidrio (g)	10	20	30
Na₂CO₃(g)	60	60	60
NaNO₃(g)	4	4	4
CaCO₃ (g)	7	7	7

Las matas obtenidas son analizadas con el MEB y sus composiciones son presentadas en la tabla 31, de dichas composiciones podemos ver que en el ensayo número 3 se alcanza un mayor contenido de cobre, es decir, que a un incremento mayor de vidrio se produce un incremento en el contenido de cobre en la mata y eso rentablemente es muy favorable.

Debemos mencionar también que los resultados tuvieron ciertas características que nos indican el buen desempeño de todas las cargas en la fusión, como es el color de la escoria que fue en todos los casos muy oscura sin rastros de una presencia elevada de cobre, otro de las características de una buena fusión es cuando se desprende con facilidad la mata de la escoria, lo que se produjo en cada uno de estos ensayos.

Tabla 31. Composición química de las matas de cobre manteniendo 10g de sílice constante e incrementos de vidrio

Mata	1	2	3
Elemento	Wt %	Wt %	Wt %
Pb	26,45	32,22	24,54
S	12,58	11,18	10,08
O	3,49	2,94	4,09
Na	5,37	5,15	3,8
Fe	4,97	4,00	2,24
C	6,36	2,33	4,54
Cu	40,78	42,18	50,71
Peso Mata (g)	20,89	22,10	21,60

Las escorias también son analizadas por medio del MEB y sus resultados se las muestran en la tabla 32, donde podemos apreciar que en todas ellas el porcentaje de Cu presente es muy bajo, al menos en el ensayo número 3, es de menos del 1% lo cual nos garantiza que la mayor parte de nuestro metal de interés se quedo en la mata, podemos decir que el ensayo 3 fue el más favorable y que el aumento de vidrio favoreció a una buena elaboración de mata y a una excelente calidad de escoria.

Tabla 32. Composición química de las escorias del ensayo de obtención de matas de cobre manteniendo 10g de sílice constante e incrementos de vidrio

Escoria	1	2	3
Elemento	Wt %	Wt %	Wt %
O	15,52	12,95	18,80
Na	28,90	2,12	31,17
Fe	20,46	21,77	18,11
C	8,64	17,26	3,23
Si	13,86	11,37	16,50
Ca	5,13	6,11	6,47
Al	1,56	0,96	1,27
K	1,98	1,3	1,35
S	3,10	2,34	2,37
Cu	0,85	1,80	0,73
Peso escoria (g)	109,45	110,00	120,00

Al darnos cuenta de que se trabajó muy bien con un mayor incremento de vidrio, en el siguiente ensayo se quiso probar si el aumento de la cantidad de sílice es la que favorece en la producción de matas y escorias es por eso que se probó fundiendo 3 nueva cargas en las cuales mantuvimos una nueva porción de sílice constante.

Esta vez se colocó 20g de sílice en todas las cargas y se adicionó porciones de 10g sucesivamente como se puede ver en la tabla 33.

Una vez obtenidas las matas son nuevamente analizadas por MEB y los resultados presentados en la tabla 34, donde claramente se puede apreciar que de forma similar a los ensayos anteriores que a medida que se incrementa el contenido de vidrio en la carga va subiendo la recuperación en porcentaje de Cu, pero también debemos resaltar que las recuperaciones de Cu son más bajas que cuando se mantenía los 10 g de sílice constante, y de una manera no halagadora vemos que el contenido de Pb en la composición es más alto que en los ensayos anteriores, esto nos indica que de alguna manera algo interfirió en este ensayo para que en la mata se propicie más la consolidación del Pb y no la del Cu, esto

no es lo que nos interesa y es por eso que se tratara de hacer nuevos ensayos donde se propicie la mayor recuperación del Cu.

También cabe mencionar que a menudo la forma de analizar en el microscopio electrónico la forma de afinar los datos se la realiza en base de los elementos que están presentes en mayor cantidad y es por eso que de pronto se pudo tomar de referencia el Pb y pudo ser esa la causa para que aparezca en mayor cantidad que en los ensayos anteriores.

Tabla 33. Cargas fundentes para la obtención de matas de cobre sustituyendo sílice por vidrio manteniendo 20 g constantes de sílice

CARGA FUNDENTE	1	2	3
Temperatura (°C)	1 200	1 200	1 200
Tiempo (h)	1	1	1
Concentrado de Cobre Tostado (g)	30	30	30
Concentrado de Cobre Crudo (g)	30	30	30
Bórax (g)	35	35	35
SiO₂ (g)	20	20	10
Vidrio (g)	10	20	30
Na₂CO₃(g)	60	60	60
NaNO₃(g)	4	4	4
CaCO₃ (g)	7	7	7

Tabla 34. Composición química de las matas de cobre manteniendo 20g de sílice constante e incrementos de vidrio

Mata	1	2	3
Elemento	Wt %	Wt %	Wt %
Pb	30,27	29,16	30,94
S	10,43	10,51	10,78
O	7,59	6,33	4,14
Na	7,60	6,48	5,30
Fe	4,74	5,42	5,76
C	2,96	4,14	2,70
Cu	36,40	37,95	40,38
Peso (g)	22,70	21,30	21,20

También las escorias fueron analizadas y presentadas en la tabla 35, de dichos resultados podemos ver la tendencia que se tiene de obtener bajos contenidos de Cu en la escoria y contenidos altos de Fe, también podemos citar las experimentación visual que se pudo apreciar, es decir, que las escorias pudieron ser removidas con mucha facilidad de las matas y que las escorias tuvieron un color negro oscuro que no correspondía a la presencia de Cu en la escoria.

Tabla 35. Composición química de las escorias del ensayo de obtención de matas de cobre manteniendo 20g de sílice constante e incrementos de vidrio

Escoria	1	2	3
Elemento	Wt %	Wt %	Wt %
O	17,13	17,97	22,03
Na	29,54	27,60	27,63
Fe	21,67	19,83	15,89
C	3,94	8,23	3,69
Si	15,19	15,77	19,34
Ca	5,70	5,67	5,89
Al	1,23	0,95	1,01
K	1,50	1,38	1,31
S	3,12	2,10	2,02
Cu	0,81	0,48	1,20
Peso escoria (g)	109,00	107,1	114,5

3.4.3 REEMPLAZOS DE VIDRIO POR CARBONATO DE SODIO EN LA CARGA FUNDENTE PARA OBTENER MATAS DE COBRE

Una vez más se optó por variar la composición de otro de los elementos de la carga fundente, esta vez realizaremos cambios en la composición del Na_2CO_3 , y según los ensayos anteriores se elimina la sílice de la carga y reducimos el bórax en comparación a los ensayos anteriores quedando la carga fundente como se especifica en la tabla 36, donde vemos que el contenido de Na_2CO_3 va disminuyendo de 10 g en cada ensayo y el contenido de vidrio va subiendo de igual manera

Tabla 36. Cargas fundentes para la obtención de matas de cobre sustituyendo Na_2CO_3 por vidrio

CARGA FUNDENTE	1	2	3
Temperatura (°C)	1 200	1 200	1 200
Tiempo (h)	1	1	1
Concentrado de Cobre Tostado (g)	30	30	30
Concentrado de Cobre Crudo (g)	30	30	30
Bórax (g)	30	30	30
Vidrio (g)	20	30	40
Na_2CO_3(g)	40	30	20
NaNO_3(g)	4	4	4
CaCO_3 (g)	7	7	7

Previo el análisis de MEB se puede ver en la tabla 37, los porcentajes de la composición de las matas obtenidos de los ensayos de fusión, dichos resultados nos revelan que las pruebas se han realizado de la mejor forma al ver que existen altos porcentajes de Cu, de los 3 ensayos vemos que el número 1 es el que tiene la mejor recuperación de Cu, esto nos indica que no alteró la falta de sílice en la carga y la disminución de bórax en la misma y también que la composición del vidrio y el Na_2CO_3 es la más adecuada.

Tabla 37. Composición química de las matas de cobre de la sustitución del Na_2CO_3 por vidrio

Mata	1	2	3
Elemento	Wt %	Wt %	Wt %
Pb	7,10	9,23	10,00
S	16,20	16,10	18,55
O	6,63	7,16	2,84
Na	3,66	3,26	2,05
Fe	5,44	8,58	13,47
C	7,31	9,16	4,41
Cu	53,67	46,51	48,68

La composición de las escorias presentadas en la tabla 38, nos hace pensar que el poco contenido de Na_2CO_3 en el ensayo número 3 hace que haya un pequeño incremento de Cu en la escoria lo cual perjudica al enriquecimiento del metal en la mata, pero es congruente que si en las matas va disminuyendo el contenido de Cu se dé el inverso en la composición de la escoria, es por eso que no es una buena opción ir rebajando el contenido de Na_2CO_3 y aumentando la proporción del vidrio.

Tabla 38. Composición química de las escorias del ensayo de obtención de matas de cobre con sustitución del Na_2CO_3 por vidrio

Escoria	1	2	3
Elemento	Wt %	Wt %	Wt %
O	14,00	20,38	20,80
Na	23,45	21,52	16,47
Fe	28,99	22,84	20,40
C	6,09	1,98	5,91
Si	12,29	17,89	18,26
Ca	9,57	8,80	9,39
Al	1,48	2,38	1,20
K	1,40	1,50	1,52
S	1,78	1,39	2,27
Cu	0,94	1,32	3,78

Para verificar que si el decremento del Na_2CO_3 en los ensayos anteriores influyó en que haya un decaimiento en los porcentajes de Cu, en los siguientes ensayos se proponen las siguientes cargas fundentes detalladas en la tabla 39, donde se hace notar que se trabajara con un contenido mayor de bórax y contenido constante de 60g de Na_2CO_3 y manteniendo el resto de la carga fundente tal cual habíamos trabajado en todos los ensayos anteriores, habiendo preparado todo lo especificado se procederá a fundir y obtener nuevas matas.

Tabla 39. Cargas fundentes para la obtención de matas de cobre con Na_2CO_3 constante mas adiciones de vidrio

CARGA FUNDENTE	1	2	3
Temperatura (°C)	1 200	1 200	1 200
Tiempo (h)	1	1	1
Concentrado de Cobre Tostado (g)	30	30	30
Concentrado de Cobre Crudo (g)	30	30	30
Bórax (g)	35	35	35
Vidrio (g)	40	50	60
Na_2CO_3(g)	60	60	60
NaNO_3(g)	4	4	4
CaCO_3 (g)	7	7	7

Una vez que se ha obtenido las matas y se ha realizado los respectivos análisis mediante el MEB se puede presentar los contenidos de las matas en la tabla 40, donde se puede observar que se produce el mismo fenómeno que se ve en los ensayos en los que se va minorando el contenido de Na_2CO_3 , esto nos indica que lo que produce que haya un decremento en el porcentaje de recuperación del Cu es el incremento del vidrio. Pero lo que sí cabe recalcar es que las composiciones en todos estos ensayos son mayores que los que se realizaron disminuyendo la composición de Na_2CO_3 .

Tabla 40. Composición química de las matas de cobre de la sustitución del Na_2CO_3 por vidrio

Mata	1	2	3
Elemento	Wt %	Wt %	Wt %
Pb	1,04	3,13	8,17
S	15,59	14,40	15,71
O	7,29	13,20	6,46
Na	1,51	5,76	4,09
Fe	2,43	4,59	4,70
C	7,93	1,17	7,77
Cu	64,21	48,75	53,11
Peso (g)	22,00	22,00	19,90

La composición de las escorias presentadas en la tabla 41, al igual que los resultados presentados en la tabla 38, nos permite darnos cuenta que al igual que el contenido de Cu en las matas va disminuyendo, en las escorias será todo lo contrario.

Tabla 41. Composición química de las escorias del ensayo de obtención de matas de cobre con sustitución del Na_2CO_3 por vidrio

Escoria	1	2	3
Elemento	Wt %	Wt %	Wt %
O	17,95	19,91	19,02
Na	30,85	30,71	24,49
Fe	18,75	15,88	13,94
C	2,65	3,04	12,41
Si	15,75	17,48	16,70
Ca	7,96	7,75	7,60
Al	1,32	1,45	1,19
K	1,25	1,16	1,18
S	2,61	2,29	2,12
Cu	0,92	0,34	1,35
Peso (g)	110,00	122,60	117,00

3.4.4 ENSAYO SIN LA PRESENCIA DE NITRATO DE SODIO EN LA CARGA FUNDENTE PARA OBTENER MATAS DE COBRE

En el siguiente ensayo se pretende determinar cómo altera el no agregar NaNO_3 en la carga fundente, en absolutamente todos los ensayos anteriores se ha utilizado NaNO_3 incluso en la carga fundente referencial y se tiene las respectivas composiciones, las cuales nos dan un referente de cuando se utiliza este reactivo, en la tabla 42, se presenta la carga fundente sin la presencia del NaNO_3 , dicha carga será sometida a fusión y será analizada mediante MEB para poder llegar a saber su composición.

Tabla 42. Cargas fundentes para la obtención de matas de cobre sin NaNO_3

CARGA FUNDENTE	
Temperatura (°C)	1 200
Tiempo (h)	1
Concentrado de Cobre Tostado (g)	30
Concentrado de Cobre Crudo (g)	30
Bórax (g)	35
Vidrio (g)	30
Na_2CO_3(g)	60
CaCO_3 (g)	7

Posterior al análisis realizado a la mata obtenida de la fusión se presenta la tabla 43, que contiene los datos de la composición de dicha mata en la cual se aprecia que tenemos un porcentaje de cobre muy bajo en comparación a la carga referencial en la que está presente el NaNO_3 , de esta experiencia podemos decir que la presencia del NaNO_3 es de suma importancia en contenido de la carga fundente. La carga necesita mucho de la capacidad oxidante del NaNO_3

Tabla 43. Composición química de la mata de cobre sin NaNO_3 en la carga

Mata	
Elemento	Wt %
Pb	5,03
S	8,93
O	27,44
Na	19,42
Fe	3,54
C	9,24
Cu	26,41

En la tabla 44, se puede apreciar la composición de las escorias en la que se ve si bien es cierto un porcentaje importante de Fe que es favorable pero también está presente un porcentaje aunque no muy alto de Cu.

Visualmente podemos darnos cuenta que la escoria tiene un tinte rojizo, lo que nos indica que hay una presencia de Cu.

Tabla 44. Composición química de las escorias del ensayo de obtención de matas de cobre sin NaNO_3 en la carga

Escoria	
Elemento	Wt %
O	15,46
Na	31,49
Fe	21,32
C	3,50
Si	13,57
Ca	7,76
Al	1,29
K	0,21
S	3,03
Cu	2,37

3.5 EVALUACIÓN DEL USO DE VIDRIO EN LA OBTENCIÓN DE COBRE METÁLICO A ESCALA LABORATORIO A PARTIR DEL CONCENTRADOS DE PACHIJAL

3.5.1 ENSAYO PARA LA OBTENCIÓN DE COBRE METÁLICO SIN LA PRESENCIA DE VIDRIO EN LA FUSIÓN DE MATAS DE COBRE

Se prepara las matas en paralelo como se especifico en la sección 3.4.1 y luego de que se obtiene las matas se presenta los valores que se indican en la tabla 45 donde podemos ver sus pesos.

Tabla 45. Pesos de Matas obtenidas sin vidrio en su composición

Mata	Peso (g)
1	21.9
2	20.5

Una vez obtenidas las matas se procedió a la fusión con la carga mostrada en la tabla 46, para obtener el metal blanco.

Tabla 46. Carga fundente para obtener metal blanco

Temperatura aproximada (°C)	1 200
Tiempo (h)	1
Bórax (g)	20
CO₃Na₂ (g)	30
SiO₂ (g)	10
C(g)	7

Al término de una hora de fusión se desprendió el supuesto metal blanco de la escoria, pero al ver que no presentaba las características de un metal blanco que es su brillo metálico, y al estar ocre al igual que el color de la mata, se realizó una nueva fusión con una carga correctiva que se distingue en la tabla 47 y se sometió a fusión por una hora a aproximadamente 1 200°C.

Tabla 47. Carga correctiva para obtener metal blanco

Reactivo	Peso (g)
Bórax	20
CO₃Na₂	30
SiO₂	20

Luego del transcurso de una hora se puede ver claramente la presencia de un compuesto más claro con un poco mas de brillo metálico y de aspecto plateado.

Una vez que se obtuvo el metal blanco procedimos a fundirlo con la carga presentada en la tabla 48, para la posterior obtención del cobre metálico que sería

un referente para calcular los próximos ensayos que se realicen ya con la presencia del vidrio. En la mencionada tabla podemos indicar que uno de los reactivos de vital importancia para la formación del cobre metálico es el nitrato de sodio ya que al tener un efecto altamente oxidante nos beneficia de sobremanera ya que en la producción del cobre metálico se utiliza en los reactores de fusión, aireadores o tubos inyectoros de oxígeno para que se pueda dar el apareamiento del cobre metálico, pero en nuestro caso por no disponer de esos reactores debemos utilizar el nitrato de sodio

Tabla 48.Carga fundente para obtener Cu metálico

Reactivo	Peso (g)
Bórax	30
CO₃Na₂	20
SiO₂	5
NaNO₃	5

Luego de una hora de fusión se removi6 la escoria, encontrándonos con la penosa experiencia de no encontrar el metal de interés para nosotros, es por eso que viendo que tal vez el horno no esté a toda su capacidad se decidió volver a realizar una serie de ensayos con metales blancos.

Los siguientes ensayos que se realizaron fueron fundidos en un crisol de grafito como se puede apreciar en la figura 37, se realizó en este tipo de crisol ya que posee mayor resistencia a la temperatura, se decidió fundir por el lapso entre 2 y 3 h para alcanzar la temperatura requerida, que en la industria trabajan sobre los 1 300°C en hornos adecuados para ese propósito.



Figura 37. Fusión en crisol de grafito

Para obtener el cobre metálico se tuvieron que realizar muchísimos ensayos y utilizar muchas cargas correctivas, de estas la que arrojó un resultado positivo es la que se presenta a continuación en la tabla 49.

Tabla 49. Carga fundente para obtener Cu metálico

Temperatura aproximada (°C)	1 250,0
Tiempo (h)	2,0
Bórax (g)	30,0
CO₃Na₂ (g)	40,0
SiO₂ (g)	10,0
CO₃Ca (g)	20,0
C (g)	7,0
NaNO₃ (g)	5,0
Clavo (g) (hierro)	2,4

Luego del término de la fusión se removió la escoria y se encontró una porción de 5 g de un compuesto de color rosado, que se asumió que se trataba del cobre metálico, ya que al tratar de pulverizarlo si bien es cierto que se fracturó también tenía cierta maleabilidad, esta muestra fue disgregada y llevada a analizar por MEB. Los resultados del análisis se presentan en la tabla 50.

Tabla 50. Composición química del producto de la fusión del metal blanco

Elemento	Wt %
Cu	53,94
Pb	36,16
Fe	0,45
Na	0,40
O	2,73
C	6,32

De los resultados que se muestran en la tabla 50, podemos ver que hay un contenido importante de Cu pero no el que se quisiera para que se pueda decir que es cobre metálico, además vemos que existe una cantidad alta de Pb lo que pudo dar las características metálicas al compuesto.

Durante la serie de ensayos que se realizó se pudo notar que en algunos de ellos la escoria se tornaba rojiza, esto debió ser que en algunas fusiones, parte del cobre se depositó en la escoria y producto de ello vemos que en la composición final existe un porcentaje no tan alto de este elemento.

3.5.2 ENSAYO PARA LA OBTENCIÓN DE COBRE METÁLICO USANDO VIDRIO EN LA CARGA FUNDENTE

Para el desarrollo de los siguientes ensayos se obtuvieron las matas de la forma que se especifica en la sección 2.5.2.1. y fruto de los ensayos se obtuvieron matas en paralelo que obtuvieron los pesos que se presentan a continuación en la tabla 51, Se debe aclarar que este no fue el único ensayo que fue realizado, pero los resultados obtenidos fueron los más aproximados a nuestros intereses.

Tabla 51. Pesos de Matas para fundir con una carga fundente que contenga vidrio.

Mata	Peso (g)
1	21,9
2	20,5

Las matas que se obtuvieron fueron fundidas como se especifica en la sección 2.5.2.2. de esta tesis para, fruto del resultado del ensayo se obtuvo un metal blanco que tuvo un peso de 39,2 g pero visualmente pudimos darnos cuenta que no se trataba de un metal blanco de buena calidad por su fragilidad y se realizo un nuevo ensayo utilizando la misma carga fundente que se uso antes, después de realizar el ensayo podemos ver que se obtiene un nuevo metal blanco de mejor apariencia y contextura que alcanzo un peso de 37,6 g pero se nota que la escoria tiene una coloración rojiza que se puede interpretar que el Cu se está escorificando, es por eso que se efectuó una nueva carga correctiva donde que primo el uso de sílice y vidrio para que se pueda fijar el cobre en la fase metálica con la ayuda de estos elementos. La composición de la nueva carga correctiva se presenta en la tabla 52.

Tabla 52. Carga correctiva para fijar el Cu en la fase metálica.

Temperatura aproximada (°C)	1 250
Tiempo (h)	2
Bórax (g)	30
CO₃Na₂ (g)	50
SiO₂ (g)	30
CO₃Ca (g)	30
NaNO₃ (g)	5

Al término del ensayo pudimos apreciar una fusión muy viscosa, en la que no se apreció la presencia alguna de Cu en la escoria ya que se pudo ver una escoria de color gris oscuro sin presencia de la coloración rojiza que se tenía anteriormente, además luego de remover la escoria se recogió un metal blanco sin presencia de cobre metálico que tuvo un peso de 35,4 g, este metal se lo fundió con la carga presentada en la tabla 53.

Luego de esta ultima fusión, al remover la escoria se encontró en la punta de la lingotera cónica una pequeña masa de color rojizo que tenía un peso de 3,4 g y se la envió a analizar mediante MEB. Los elementos reportados en el análisis se presentan en la tabla 54.

Tabla 53. Carga correctiva para obtener Cu metálico

Temperatura aproximada (°C)	1 250
Tiempo (h)	2
Bórax (g)	30
Vidrio (g)	50
NaNO₃ (g)	15

Tabla 54. Composición del producto de la fusión para obtener Cu metálico utilizando vidrio como fundente

Elemento	Wt %
Cu	18,42
Pb	74,51
Fe	0,37
Na	0.64
O	2,30
C	3,76

De los resultados presentados podemos ver que existe una composición alta de Pb y que el Cu pudo haberse desprendido en las escorias.

3.5.3 ENSAYO PARA LA OBTENCIÓN DE COBRE METÁLICO USANDO VIDRIO TANTO EN LA ELABORACIÓN DE MATAS COMO EN LA FUSIÓN DE LAS MISMAS

En la realización de estas pruebas se procedió a obtener matas de cobre según la metodología presentada en la sección 2.5.3.1, la fusión se puede apreciar que es muy buena ya que su escoria no presenta rastros de Cu, es fácil de colar y las matas se desprenden con facilidad.

Una vez que se obtuvieron las matas y fueron desprendidas de sus escorias fueron pesadas, a continuación se presenta los pesos de dichas matas en la tabla 55.

Tabla 55. Pesos de Matas obtenidas con cargas fundentes con presencia de vidrio.

Mata	1	2	3
Peso (g)	45,5	47,5	50,0

Una vez más podemos distinguir que el proceso de fusión de las matas se lo llevo de buena manera debido al color negro de la escoria.

Las matas obtenidas fueron pulverizadas y analizadas químicamente mediante absorción atómica, los resultados que arrojaron los análisis se presenta en la tabla 56, donde se puede ver que hay un contenido muy importante de Cu en la mata

Tabla 56. Composición química de las matas obtenidas con cargas fundentes con vidrio

Elemento	Porcentaje (Wt%)
Cu	52,54
Fe	4,78
Pb	8,46
Zn	0,99

Luego que las matas son fundidas para la obtención del metal blanco como se lo explica en la sección 2.5.3.2 se las trata de forma que puedan ser analizadas de la misma forma y acerca de los mismos elementos que se analizo a las matas, presentándose así los resultados en la tabla 57, donde podemos ver que existe una presencia superior de Cu mucho mayor que el contenido que había en la mata, esto nos indica que el metal blanco es de muy buena calidad.

Al metal blanco obtenido se lo fundió de la manera especificada en la sección 2.5.3.3. y se obtuvo un nuevo metal blanco pero recubierto de Cu metálico, nuestro metal de interés esta incrustado en la escoria que acompaña al metal blanco como se puede ver en la figura 38.

Tabla 57. Composición química del metal blanco obtenido con cargas fundentes con Vidrio

Elemento	Porcentaje (Wt%)
Cu	69,25
Fe	1,15
Pb	12,74
Zn	0,27



Figura 38. Metal blanco con presencia de Cu incrustado en la escoria

Para tratar de coleccionar nuestro metal deseado practicamos una carga correctiva donde que primo el vidrio ya que al tener un alto contenido de sílice, este fijara el contenido metálico en especial del cobre en la fase metálica, la carga correctiva se detalla en la tabla 58.

Tabla 58. Carga correctiva para la obtención de Cu metálico

Temperatura aproximada (°C)	1 300
Tiempo (h)	2
Bórax (g)	40
Vidrio (g)	150
KNO₃ (g)	20

Una vez que se realizó la fusión podemos apreciar que tenemos el mismo problema en los diversos ensayos realizados para tratar de evitar este problema, en las figura 39, podemos apreciar que no se puede despojar el Cu metálico de la escoria.



Figura 39. Cobre metálico incrustado en la escoria

En la figura 40, podemos apreciar que cada vez que se fue fundiendo nuevamente el Cu sigue pegado a la escoria y cada vez la escoria se va tornando rojiza indicándose que el metal de nuestro interés se va perdiendo



Figura 40. Escoria con presencia de Cu

3.6 EVALUACIÓN DEL USO DE VIDRIO EN LAS OPERACIONES DE FUSIÓN A ESCALA LABORATORIO DE CONCENTRADOS DE PACTO PARA RECUPERAR ORO Y PLATA

Estas pruebas están destinadas a ver el comportamiento de las variaciones de carbonato de sodio, bórax y carbonato de calcio y su sustitución por vidrio de desecho en la carga fundente, ya que al tener demasiada sílice el mineral en su composición natural hace innecesaria la aplicación de la misma

3.6.1 PREPARACIÓN DE LA CARGA FUNDENTE REFERENCIAL PARA LA OBTENCIÓN DE ORO Y PLATA

Se preparo una carga fundente para tener una referencia de valores para comparar con los ensayos posteriores, a continuación en la tabla 59. se presenta la composición de la carga fundente.

Tabla 59.Carga fundente de referencia para la obtención de Au y Ag

CARGA FUNDENTE	
Temperatura (°C)	1 200
Tiempo (h)	1
Muestra (g)	30
Bórax (g)	30
Vidrio (g)	0
Na₂CO₃ (g)	40
PbO (g)	40
CaCo₃ (g)	7
C (g)	2

Se la realizó ensayos en paralelo donde se tomó el valor promedio como valor referencial los resultados de todo el proceso de recuperación de metales preciosos se presenta en la Tabla 60.

Tabla 60. Resultados de la fusión de la carga fundente referencial

Nº	Peso del Régulo (g)	Peso del Doré (G)	Peso de Oro (gr./TM)	Peso de Plata (g/TM)
1	32,80	0,06540	376,67	1 803,34
2	33,30	0,06613	362,67	1841,67
Promedio	33,05	0,06577	369,67	1 822,51

Se pudo ver que existe una recuperación muy alta de Au y Ag debido a que es un mineral que fue previamente concentrado

3.6.2 REEMPLAZOS DE BÓRAX POR VIDRIO EN LA CARGA FUNDENTE PARA OBTENER ORO Y PLATA

Se procedió a realizar los reemplazos de bórax por el vidrio siguiendo la metodología descrita en la sección 2.6.2 y a continuación se presenta en la tabla 61. la composición de las cargas fundentes para realizar cada uno de los ensayos al fuego.

Tabla 61. Carga fundente con reemplazos de bórax por vidrio para obtener Au y Ag

CARGA FUNDENTE	1	2	3
Temperatura(°C)	1 200	1 200	1 200
Tiempo (h)	1	1	1
Muestra (g)	30	30	30
Bórax (g)	20	10	0
Vidrio (g)	10	20	30
Na ₂ CO ₃ (g)	40	40	40
PbO (g)	40	40	40
CaCO ₃ (g)	0	0	0
C (g)	2	2	2

Una vez que se culminó todo el ensayo se puede apreciar los resultados en la tabla 62 donde se presenta las recuperaciones de los metales preciosos y porcentaje de recuperación en función al ensayo de referencia.

Tabla 62. Resultados de la fusión de las cargas fundentes con reemplazos de bórax por vidrio

Peso de vidrio (g)	Peso del Régulo (g)	Peso del Doré (g)	Peso de Oro (g/TM)	Peso de Plata (g/TM)	% Rec/ % Ref. Au	% Rec/ % Ref. Ag
10	36,3	0,06574	376,33	1 815,00	101,80	99,60
20	25,0	0,06422	351,67	1 789,00	95,13	98,16
30	25,8	0,06266	304,00	1 784,67	82,23	97,50

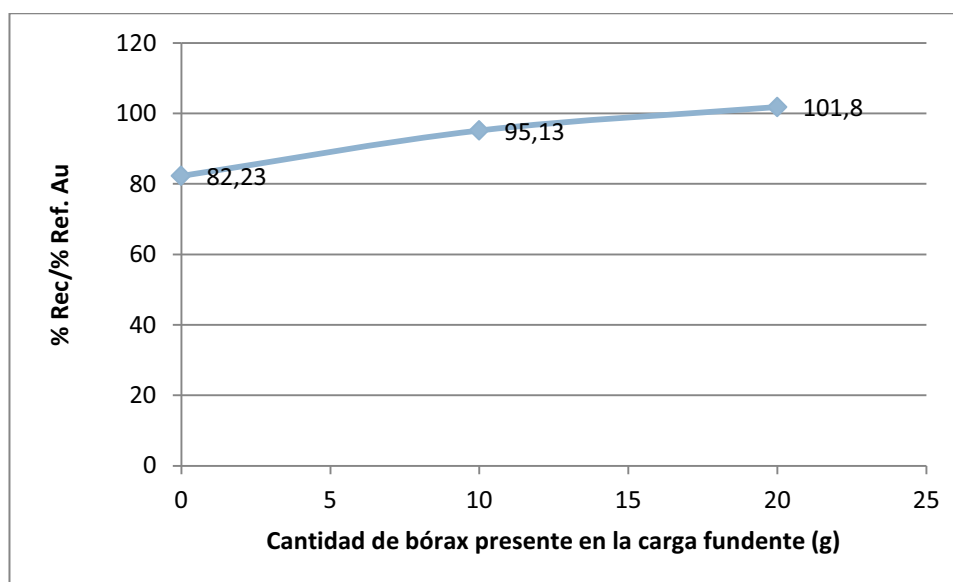


Figura 41. Gráfico de recuperación de Au en función de la presencia de bórax en la carga fundente

En la figura 41, se puede notar claramente que al existir una disminución del bórax en la carga fundente la recuperación del Au se ve reducida, pero también se puede apreciar que para una recuperación del 100% se puede utilizar una porción de bórax menor que la utilizada en el ensayo de referencia.

3.6.3 REEMPLAZOS DE VIDRIO POR CARBONATO DE SODIO EN LA CARGA FUNDENTE PARA OBTENER ORO Y PLATA

Los ensayos se realizaron de acuerdo a lo estipulado en la sección 2.6.3 y a continuación en la tabla 63, se hace la presentación de las cargas fundentes utilizadas y sus parámetros de fusión

Tabla 63. Carga fundente con reemplazos de Na_2CO_3 por vidrio para obtener Au y Ag

3	1	2	3	4
Temperatura (°C)	1 200	1 200	1 200	1 200
Tiempo (h)	1	1	1	1
Muestra (g)	30	30	30	30
Bórax (g)	30	30	30	30
Vidrio (g)	10	20	30	40
Na_2CO_3(g)	30	20	10	0
PbO (g)	40	40	40	40
CaCO_3 (g)	0	0	0	0
C (g)	2	2	2	2

En la tabla 64, se presenta los resultados de los ensayos al fuego donde podremos apreciar los valores de las recuperaciones de Au y Ag

Tabla 64. Resultados de la fusión de las cargas fundentes con reemplazos de Na_2CO_3 por vidrio

Peso de vidrio (g)	Peso del Régulo (g)	Peso del Doré (g)	Peso de Oro (g/TM)	Peso de Plata (g/TM)	% Rec/ % Ref. Au	% Rec/ %Ref. Ag
10	13,4	0,0580	378,00	1 555,33	102,25	85,34
20	4,0	0,0555	292,33	1 560,67	79,00	85,63
30	7,2	0,0559	328,67	1 543,33	88,91	84,68
40	21,6	0,0470	331,67	1 748,67	89,71	95,95

En la figura 42, se representa la recuperación de oro y plata en función de la cantidad de carbonato de sodio presente en la carga, donde se puede apreciar que la recuperación del oro al principio sufre un descenso hasta que se mantiene casi constante en las recuperaciones con una menor presencia de carbonato, por otra parte en cambio la plata se va manteniendo constante y luego alcanza una mayor recuperación a medida que se va poniendo menos carbonato en la carga.

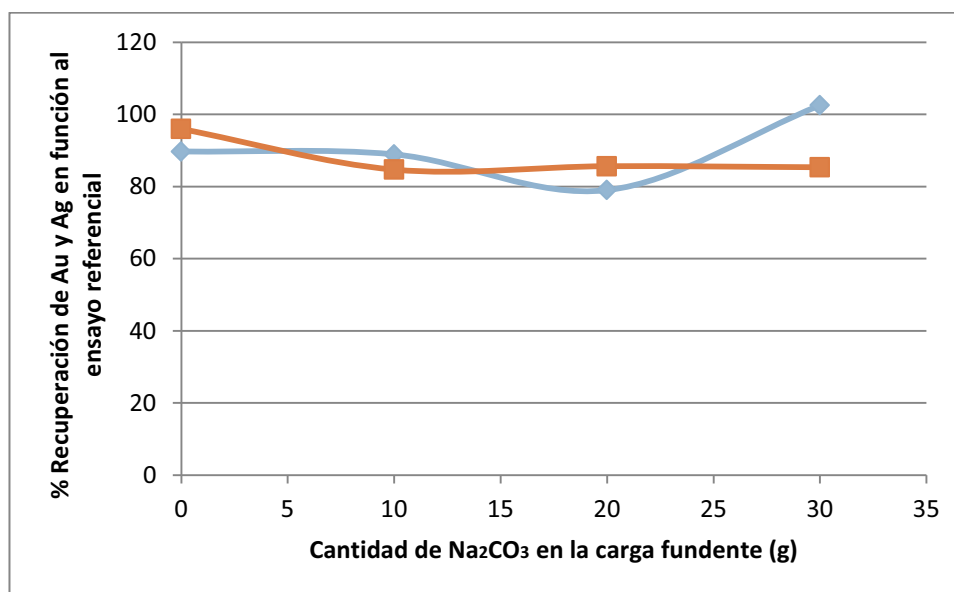


Figura 42. Gráfico de recuperación de Au en función de la presencia de Na_2CO_3 en la carga fundente

3.6.4 ENSAYOS DE PRUEBA Y ERROR

Una vez que se realizaron las sustituciones de bórax y de carbonato tenemos una idea para seguir con los ensayos de prueba y error pero de una manera sistemática.

En la tabla 65, se presenta una disminución tanto del carbonato de sodio como del bórax ya que al revisar los resultados anteriores si se baja una porción de 10g, no se altera de una forma drástica en los resultados, a estos ensayos le agregamos diferentes cantidades de vidrio.

Tabla 65. Carga fundente con una disminución de bórax y Na_2CO_3 y adiciones de vidrio

CARGA FUNDENTE	1	2	3
Temperatura(°C)	1 200	1 200	1 200
Tiempo (h)	1	1	1
Muestra (g)	30	30	30
Bórax (g)	20	20	20
Vidrio (g)	10	20	30
Na_2CO_3(g)	30	30	30
PbO (g)	40	40	40
CaCO_3 (g)	0	0	0
C (g)	2	2	2

En la tabla 66 se presenta los valores que se obtuvieron del régulo que luego se lo copelo y se obtuvo los dorés y sus consiguientes recuperaciones de Au y Ag

Tabla 66. Resultados de la fusión de las cargas con una disminución de bórax y Na_2CO_3 y adiciones de vidrio

Peso de vidrio (g)	Peso del Régulo (g)	Peso del Doré (g)	Peso de Oro (g/TM)	Peso de Plata (g/TM)	% Rec/ % Ref. Au	% Rec/ % Ref. Ag
10	28,5	0,06095	349,34	1 682,18	94,5	92,3
20	27,5	0,06041	346,04	1 667,59	93,6	91,5
30	25,8	0,06230	350,80	1 725,92	94,9	94,7

En el siguiente ensayo se utilizó las cargas presentadas en la tabla 67 donde se puede ver que se utilizó una menor porción de Na_2CO_3 en todas las cargas y se sustituye diferentes porciones de vidrio.

Tabla 67. Cargas fundentes con una porción de 20g de Na₂CO₃ y aumentos de vidrio

CARGA FUNDENTE	1	2	3
Temperatura(°C)	1 200	1 200	1 200
Tiempo (h)	1	1	1
Muestra (g)	30	30	30
Bórax (g)	20	20	20
Vidrio (g)	10	20	30
Na₂CO₃(g)	20	20	20
PbO (g)	40	40	40
CaCO₃ (g)	0	0	0
C (g)	2	2	2

Seguidamente presentamos en la tabla 68, los resultados que se obtuvieron luego de la fusión y su correspondiente copelación, donde se aprecia buenas recuperaciones para la plata, pero recuperaciones no tan altas para el Au que es nuestro principal parámetro.

Tabla 68. Resultados de la fusión de las cargas con una porción de 20 gr de Na₂CO₃ y adiciones de vidrio

Peso de vidrio (g)	Peso del Régulo (g)	Peso del Doré (g)	Peso de Oro (g/TM)	Peso de Plata (g/TM)	% Rec/ % Ref. Au	% Rec/ % Ref. Ag
10	25,8	0,06266	304,00	1 784,67	82,23	97,50
20	25,3	0,06176	316,33	1 742,33	85,57	95,60
30	26,2	0,06592	315,00	1 882,33	85,00	103,28

En el siguiente ensayo se lo realizo para ver el comportamiento en la fusión a las cargas al ir aumentando en forma muy baja la cantidad de CaCO₃, a continuación se presenta en la tabla 69, la composición de las diferentes cargas

Tabla 69. Cargas fundentes con incrementos de CaCO₃

CARGA FUNDENTE	1	2	3
Temperatura(°C)	1 200	1 200	1 200
Tiempo (h)	1	1	1
Muestra (g)	30	30	30
Bórax (g)	20	20	20
Vidrio (g)	20	20	20
Na₂CO₃(g)	30	30	30
PbO (g)	40	40	40
CaCO₃ (g)	1	2	3
C (g)	2	2	2

Siguiendo el mismo procedimiento que para los anteriores ensayos presentamos en la tabla 70, los valores relevantes del producto de la fusión y de la copelación, donde vemos que las recuperaciones de Au tienden a aumentar aunque no en una gran escala pero tiene una tendencia a subir su recuperación que dicho sea de paso es muy buena a medida que se aumenta el contenido de CaCO₃ en la carga fundente

Tabla 70. Resultados de la fusión de las cargas con incrementos de CaCO₃

Peso de CaCO₃ (g)	Peso del Régulo (g)	Peso del Doré (g)	Peso de Oro (g/TM)	Peso de Plata (g/TM)	% Rec/ % Ref. Au	% Rec/ % Ref. Ag
1	18,3	0,5414	350,67	1 454,00	94,80	79,80
2	25,0	0,6422	351,67	1 789,00	95,13	98,16
3	21,6	0,0636	353,00	1 766,33	95,49	96,92

El próximo ensayo servirá para ver la influencia que pueda tener la cantidad de carbón en la carga fundente, en la tabla 71, se puede ver las cargas fundentes, se ha reproducido la carga fundente que tuvo mejor recuperación en el ensayo anterior y se ha realizado una pequeña variación en el peso del carbón.

Tabla 71. Cargas fundentes con incrementos de C

CARGA FUNDENTE	1	2	3
Temperatura(°C)	1 200	1 200	1 200
Tiempo (h)	1	1	1
Muestra (g)	30	30	30
Bórax (g)	20	20	20
Vidrio (g)	20	20	20
Na₂CO₃(g)	30	30	30
PbO (g)	40	40	40
CaCO₃ (g)	3	3	3
C (g)	1	2	3

De este ensayo se pudo discernir que aunque no parezca que una cantidad tan pequeña de un reactivo que a simple vista pueda no parecer importante, es muy beneficioso saber ubicar una porción adecuada, en la tabla 72, podemos fijarnos que luego de realizar todo el debido proceso de fusión y copelación, tenemos una recuperación favorable al aumento del peso del carbón , aunque sea solamente el aumento de 1 g en cada ensayo estos presentan un incremento favorable en la recuperación de nuestro metal precioso de interés.

Tabla 72. Resultados de la fusión de las cargas con incrementos de C

Peso de C (g)	Peso del Régulo (g)	Peso del Doré (g)	Peso de Oro (g/TM)	Peso de Plata (g/TM)	% Rec/ % Ref. Au	% Rec/ % Ref. Ag
1	21,6	0,04700	331,67	1 748,67	89,71	95,95
2	29,7	0,06332	357,67	1 753,00	96,75	96,19
3	23,7	0,06237	360,00	1 719,00	97,38	94,32

De la realización de diversos ensayos de prueba y error se ha ido enriqueciendo al ir viendo las recuperaciones que producen cada uno de ellos, es por eso que se planteó la carga fundente presentada en la tabla 73, donde hemos querido plasmar el conocimiento que nos dieron los ensayos anteriores.

Tabla 73. Carga fundente diseñada

CARGA FUNDENTE	1
Temperatura(°C)	1 200
Tiempo (h)	1
Muestra (g)	30
Bórax (g)	20
Vidrio (g)	20
Na₂CO₃(g)	30
PbO (g)	40
CaCO₃ (g)	7
C (g)	2

Luego de realizar la fusión y ser copelado el régulo obtenido podemos ver en la tabla 74, los resultados obtenidos de nuestro ensayo, el cual es muy favorable ya que presenta una recuperación muy buena y cabe recalcar que se ha logrado rebajar la composición de los reactivos en comparación a la carga fundente experimental, se puede ver que se ha encontrado una buena carga fundente que tiene en su composición vidrio de desecho y alcanza una recuperación de Au y Ag muy representativas.

Tabla 74. Resultados de la fusión de las carga fundente diseñada

Peso del Régulo (g)	Peso del Doré (g)	Peso de Oro (g/TM)	Peso de Plata (g/TM)	% Rec/ % Ref. Au	% Rec/ % Ref. Ag
28,6	0,06370	366,67	1 755,67	99,19	96,33

3.6.5 USO DE DIFERENTES CLASES DE VIDRIO EN LA CARGA FUNDENTE PARA OBTENER ORO Y PLATA

Una vez que se encontró la carga fundente que presente las mejores recuperaciones de nuestros metales preciosos se realizo ensayos con diferentes tipos de vidrios para la fusión y se empleo la misma carga fundente para cada uno de ellos como se puede distinguir en la tabla 75.

Tabla 75. Carga fundente con diferentes vidrios

Tipo de vidrio	Blanco	Verde	Ámbar
Temperatura(°C)	1 200	1 200	1 200
Tiempo (h)	1	1	1
Muestra (g)	30	30	30
Bórax (g)	20	20	20
Vidrio (g)	20	20	20
Na ₂ CO ₃ (g)	30	30	30
PbO (g)	40	40	40
CaCO ₃ (g)	7	7	7
C (g)	2	2	2

Una vez que culmino la fusión , copelamos cada uno de los régulos obtenidos y los resultados son presentados en la tabla 76, en donde se puede apreciar que los 3 tipos de vidrio presentan una recuperación de Au y Ag muy buena, pero en el caso del vidrio verde y ámbar se puede ver que se presenta una ligera disminución en las recuperaciones, esto puede deberse a que en estos tipos de vidrios están presentes diferentes tipos de óxidos metálicos, los cuales son los que dan el color característico a las botellas y estos mismos óxidos pueden representar una interferencia en la fusión y así no lograr una correcta recuperación.

Tabla 76. Resultados de la fusión de las carga fundente con distintos vidrios

Tipo de vidrio	Peso del Régulo (g)	Peso del Doré (g)	Peso de Oro (g/TM)	Peso de Plata (g/TM)	% Rec/ % Ref. Au	% Rec/ % Ref. Ag
Blanco	28,6	0,06370	366,67	1 755,67	99,19	96,33
Verde	29,7	0,06332	357,67	1 753,00	96,75	96,19
Ámbar	23,7	0,06237	360,00	1 719,00	97,38	94,32

3.7 CARACTERIZACIÓN DE LA CARGA FUNDENTE EN UN SISTEMA TERNARIO B_2O_3 - Na_2O - SiO_2

Para la realización de este estudio se determinó la cantidad de Na_2O , SiO_2 y B_2O_3 presentes tanto en el concentrado como en la carga fundente. Para esto, se analizaron los resultados de la tabla 13, donde están cuantificados los compuestos presentes en el concentrado de la zona de Pacto. Primero, se calculó el aporte de SiO_2 proveniente del mineral de Pacto. Después se calculó la cantidad de Na_2O generado por la reacción de descomposición del Na_2CO_3 presente en la carga fundente. Luego, se calculó la cantidad de B_2O_3 producto de la descomposición del $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ presente en cada carga fundente. Finalmente, se calculó los porcentajes de Na_2O , B_2O_3 y SiO_2 que serán colocados en el sistema ternario. Los cálculos se detallan en el anexo IV.

En el diagrama ternario de la figura 44, se colocó los porcentajes de los compuestos que intervienen en este sistema que están en la carga y en la composición del concentrado, las composiciones representadas en el diagrama se encuentran en la tabla 77.

Tabla 77. Porcentajes de Na_2O , B_2O_3 y SiO_2 en el sistema ternario para la calcina de Pacto

Compuesto	Porcentaje (Wt %)
Na_2O	35,2
B_2O_3	19,8
SiO_2	45,0

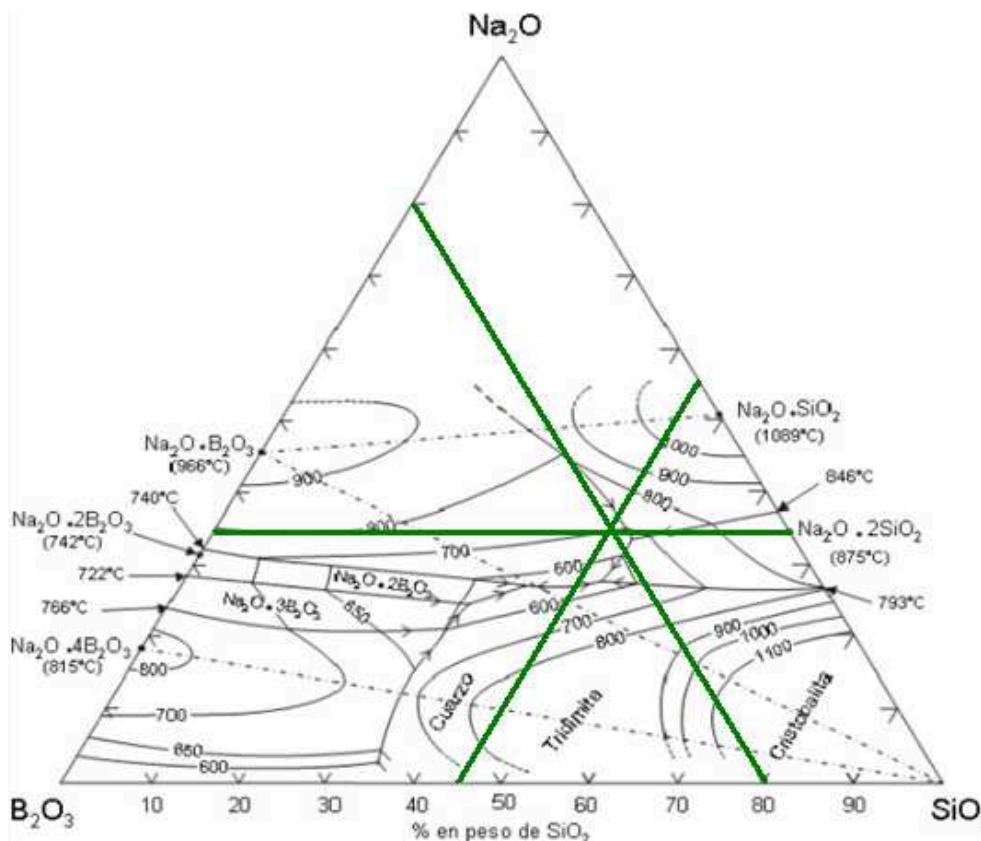


Figura 43. Diagrama ternario Na_2O , B_2O_3 y SiO_2 para la carga fundente referencial para el concentrado de pacto

En la figura 43, podemos apreciar que la temperatura de fusión es mayor a los 800 °C que nos ayuda mucho a tomar en cuenta factores que pueden bajar costos.

En el diagrama ternario de la figura 44, se colocó los porcentajes de los compuestos que intervienen en este sistema que en este caso está dado por el SiO_2 aportado por el mineral mas el aporte de este mismo oxido presente en el vidrio que se adiciona a la carga fundente y el Na_2O y B_2O_3 fruto de las reacciones de descomposición ya mencionadas de los reactivos de la carga fundente, las composiciones representadas en el diagrama se encuentran en la tabla 78.

Tabla 78. Porcentajes de Na_2O , B_2O_3 y SiO_2 en el sistema ternario la carga fundente con presencia de vidrio en su constitución

Compuesto	Porcentaje (Wt %)
Na_2O	35,2
B_2O_3	10,4
SiO_2	45,0

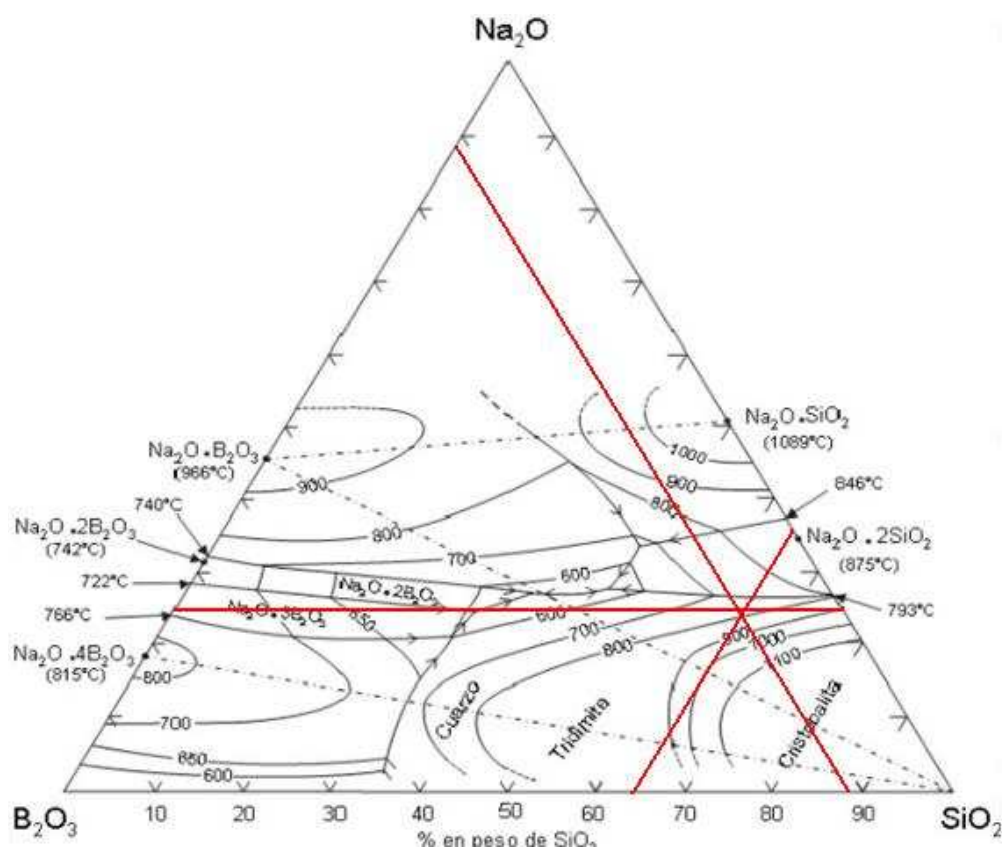


Figura 44. Diagrama ternario Na_2O , B_2O_3 y SiO_2 para la carga fundente con presencia de vidrio en su constitución

3.8 EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL USO DE LOS DESECHOS DE VIDRIO EN LAS OPERACIONES DE FUSIÓN

En esta sección de nuestro estudio más que una evaluación económica se realizó una comparación económica entre las cargas que poseen vidrio de desecho en su composición con sus debidos reemplazos y las cargas de referencia.

Para llevar a cabo esta parte del estudio en primer lugar se consultaron los precios de los reactivos que interactúan en las cargas fundentes, en la tabla 79, se puede ver los precios de los reactivos

Tabla 79. Precios de los reactivos que se utilizan en las cargas fundentes

Reactivo	Cantidad	Precio (USD)
Bórax	10 kg	46,75
Na ₂ CO ₃	25 kg	11,98
Arena Silícica	1 TM	250,00
PbO	25 kg	158,61
CaCO ₃	50 kg	7,10
KNO ₃	22,7 kg	52,36
Vidrio	1 TM	60,00

Se tomaron las cargas referenciales para los ensayos tanto con el mineral de Pacto para la obtención de Au y Ag así como también para el mineral de Pachijal pero dicho sea de paso solamente para la elaboración de matas de Cu y se saca un aproximado de su valor total.

En la tabla 80, se tiene las composiciones y el precio de toda la carga fundente para realizar el ensayo al fuego para obtener Au y Ag tanto el de referencia como el que tiene los reemplazos con vidrio de desecho, al revisar estos datos podemos ver que el ensayo que fue realizado con el vidrio en la composición de la carga tiene un menor precio que el que se realizó sin vidrio, se puede decir que tenemos un ahorro económico del 12,2%, debido a que al utilizar el vidrio se pudo reducir el consumo de bórax y Na₂CO₃

Tabla 80. Composición y precios de las cargas fundentes de referencia y con remplazos de vidrio para la obtención de Au y Ag

Reactivo	Peso Carga Referencia 1 (g)	Precio para 1 ensayo (USD)	Precio para 100 ensayos (USD)	Peso carga con remplazos (g)	Precio para 1 ensayo (USD)	Precio para 100 ensayos (USD)
Bórax	30	0,1410	14,10	20	0,0940	9,40
Vidrio	0	0,0000	0,00	20	0,0012	0,12
Na ₂ CO ₃	40	0,0192	1,92	30	0,0144	1,44
PbO	40	0,2536	25,36	40	0,2536	25,36
CaCO ₃	7	0,0009	0,09	7	0,0009	0,09
C	2	-	-	2	-	-
	Total	0,4147	41,47		0,3642	36,42

En la tabla 81, se tiene las composiciones y el precio de toda la carga fundente para realizar el ensayo al fuego para la obtención de matas de Cu, tanto la de referencia como la que tiene los remplazos con vidrio de desecho y de estos datos podemos apreciar que el ensayo que fue realizado con el vidrio en la composición de la carga tiene un menor precio que el que se realizó sin vidrio, se puede decir que tenemos un ahorro económico del 18.66%, debido a que al utilizar el vidrio se dejó de utilizar la arena silícica que posee mayor valor económico y se pudo reducir el consumo de bórax y Na₂CO₃

Tabla 81. Composición y precios de las cargas fundentes de referencia y con remplazos de vidrio para la obtención de matas de Cu.

Reactivo	Peso Carga Referencial (g)	Precio para 1 ensayo (USD)	Precio para 100 ensayos (USD)	Peso carga con remplazos (g)	Precio para 1 ensayo (USD)	Precio para 100 ensayos (USD)
Bórax	35	0,1410	14,10	30	0,1410	14,10
Vidrio	0	0,0000	0,00	20	0,0012	0,12
Na ₂ CO ₃	60	0,0192	1,92	40	0,0128	1,28
Arena Silícica	30	0,0075	0,75	0	0,0000	0,00
CaCO ₃	7	0,0009	0,09	7	0,0009	0,09
KNO ₃	4	0,0092	0,92	4	0,0092	0,92
	Total	0,2004	20,04		0,1630	16,3

Cabe mencionar que en las tablas 80 y 81, también se mostraron los valores que serían necesarios para la elaboración de 100 ensayos, esto se lo hizo para tener un valor más representativo, ya que por tratarse de un trabajo a escala laboratorio las cargas fundentes tienen pesos bajos que vistos individualmente no parecen representativos.

También por tratarse de ser un estudio a escala laboratorio y porque el vidrio se lo obtuvo de forma gratuita no se ha puesto un valor agregado a todo lo que es recolección, disminución de tamaño, y almacenamiento , pero esto para un proyecto a escala mayor se debe tomar muy en cuenta

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- De los ensayos preliminares para la fusión de vidrio se puede apreciar que a un menor diámetro de partícula, se funde este de mejor manera y que los componentes de la carga como el carbonato de sodio y el carbonato de calcio no actúan de una forma deseada en su uso individual en la fusión.
- En la sustitución total de vidrio por la sílice en la obtención de matas de cobre se tiene un 99,3% de presencia de cobre en referencia a su ensayo referencial, viéndose así que todos los reemplazos parciales tienen una recuperación sobre la mencionada.
- La sustitución de Carbonato de Sodio en la obtención de matas de Cobre, tiene una recuperación mayor al 93% en comparación al ensayo referencial, esto es tomado de forma positiva ya que hay una reducción del uso de Carbonato de Sodio, ya que dicho reactivo es regulado por el CONSEP por ser precursor de varios alcaloides de fabricación restringida.
- En el ensayo para la obtención de matas de cobre manteniendo 10 g de Sílice constante en la carga fundente y con adiciones de vidrio se nota en sus recuperaciones que al aumentar la mayor porción de vidrio se logra conseguir una recuperación total respecto al ensayo referencial.
- En el ensayo para la obtención de matas de cobre manteniendo constantes 20 g de Sílice en la carga fundente con adiciones de vidrio se nota que se recupera porcentajes superiores al 73% en comparación al ensayo referencial en todos los casos, viendo que en la adición de 30 g de vidrio se recupera cerca del 90% de cobre.

- En los ensayos de reemplazo de vidrio por Carbonato de Sodio en la carga para obtener matas de cobre se observa que al subir la composición de vidrio en la carga y bajar la composición de Carbonato de Sodio en la misma decrece la recuperación de cobre en la composición de la mata, alrededor de un 7%.
- Para los ensayos de obtención de matas de cobre con 60 g de Carbonato de Sodio constante en la carga y adiciones de vidrio se nota que en todos los casos se recupera sobre el 100% de cobre en relación al ensayo de referencia.
- En el ensayo de obtención de matas de cobre sin la presencia de nitrato de sodio en la carga se puede notar que hay una recuperación de cobre de alrededor del 50% en relación al ensayo de referencia, esto se debe a que al no estar presente dicho reactivo, no se produce bien las reacciones de fusión por no contar con las características oxidantes del reactivo antes mencionado.
- Para los ensayos de obtención de cobre metálico, sin la presencia de vidrio en la carga fundente, se puede verificar mediante una termocupla que el horno no alcanza la temperatura de 1 300° C que es la mínima para la obtención de un metal blanco que es la antesala del cobre metálico.
- En los ensayos de la obtención de cobre metálico sin presencia de vidrio en la carga fundente, para la generación de metal blanco de cobre se tiene que elaborar cargas correctivas con presencia de bórax, carbonato de sodio y sílice.
- Para la obtención de cobre metálico sin presencia de vidrio en la carga fundente, se ve necesario agregar de 5 a 15 g de nitrato de sodio en las cargas correctivas con el objetivo de crear una atmósfera oxidante debido a que industrialmente se introduce aire u oxígeno dentro del reactor para la obtención del metal de interés.

- En el ensayo de obtención de cobre metálico sin la presencia de vidrio en la carga fundente se vio la necesidad de utilizar crisoles de grafito para poder realizar las fusiones debido a que se realizaron en lapsos mayores de tiempo y esto ocasionaba que se deformen los crisoles cerámicos.
- En el ensayo de obtención de cobre metálico sin la presencia de vidrio en la carga fundente, luego de realizar algunas cargas correctivas en la fusión del metal blanco de cobre, se removió de la escoria una masa de 5 g de un compuesto color rojizo que presentaba características metálicas como la ductibilidad y la maleabilidad.
- El compuesto obtenido en el ensayo de obtención de cobre metálico sin la presencia de vidrio en la carga fundente, al ser analizado mediante microscopía electrónica de barrido, presenta un contenido de 53,94% de cobre, el cual se podría comparar con el porcentaje de obtención de cobre en una mata lograda en cualquiera de los ensayos de este proyecto de investigación.
- El compuesto obtenido en el ensayo de obtención de cobre metálico sin la presencia de vidrio en la carga, contiene un 36,16% de plomo, lo que podría dar la apariencia y cualidades metálicas, la poca presencia de cobre en este compuesto se debe a que en la realización de las diferentes cargas correctivas tanto para la obtención del metal blanco de cobre como el cobre metálico mismo, se produjeron pérdidas de este elemento preciado para nosotros.
- Para la realización de ensayos para la obtención de cobre metálico usando vidrio tanto en la elaboración de matas como en la fusión de las mismas, se obtienen matas del 100% de recuperación con respecto al ensayo referencial.
- Para la realización de ensayos para obtención de cobre metálico usando vidrio en la elaboración y fusión de matas, se puede observar que al trabajar con una porción un poco más significativa de concentrado se llega a ver mejores resultados.

- En el proceso en el que se llegó a obtener cobre metálico utilizando vidrio en las diversas fusiones se puede notar que el cobre metálico recubre la escoria y es difícil removerla de ella, esto se debe a que en las pruebas realizadas no se utilizó un convertidor y un sedimentador debido a la falta de estos equipos en nuestro laboratorio.
- Debido a que el cobre metálico obtenido se encuentra incrustado en la escoria, como se puede ver en la figura 40 no se puede realizar un análisis del mismo, ya que al disgregarlo se tomaría una parte de escoria la cual sería una interferencia al momento de obtener la composición de nuestro metal buscado.
- Para los ensayos de obtención de oro y plata utilizando el concentrado de Pacto se alcanza 369,7 g/TM de oro y 1822,51g/TM de plata, estos datos son utilizados de recuperación de referencia.
- Debido a que el concentrado de Pacto tiene una gran cantidad de Sílice en su composición no se ocupa este reactivo en la carga fundente para la obtención de los metales preciosos.
- En los ensayos de obtención de oro y plata, se realiza una sustitución de bórax por vidrio en la carga fundente, en los que se puede ver que a razón de que se aumenta el vidrio, disminuye la recuperación de oro en un 17,8%
- En los ensayos de obtención de oro y de plata, se realizan sustituciones de vidrio por carbonato de sodio en la carga fundente, en donde se puede apreciar que a menudo que se aumenta el vidrio y disminuye el carbonato, la recuperación de oro sufre un descenso inicialmente hasta estabilizarse en recuperaciones del 89% en comparación al ensayo de referencia, lo que no ocurre con la recuperación de la plata que pasa todo lo contrario.
- De la realización de ensayos de prueba y error se llega a obtener una carga fundente con la que se llega a tener una recuperación del 99,19% de oro y un 96,33% de plata, en comparación al ensayo referencial, dicha carga tiene la

característica de que se usa 20 g de vidrio y hay una disminución del 33,3% de la composición de bórax y un 25% en la de carbonato de sodio.

- Con la carga obtenida que presentó las mejores recuperaciones para nuestros metales preciosos, se realizó ensayos manteniendo la misma carga fundente y utilizando vidrio verde y ámbar, donde que se obtuvo una recuperación sobre el 96% en cada uno de los ensayos realizados con los distintos vidrios, esta variación en los porcentajes se debe a la presencia de óxidos metálicos (óxidos de hierro, cobre y cromo generalmente usados en botellas verdes y de color ámbar) en los vidrios mencionados, los cuales pueden ocasionar una interferencia para lograr la misma recuperación que tiene el vidrio blanco.
- Al realizar una comparación económica entre la carga que posee vidrio de desecho en su composición y al carga referencial para el concentrado de Pacto se nota una disminución del 12,2% de su valor debido a que al utilizar el vidrio en la carga fundente, se reduce el consumo de bórax y carbonato de sodio.
- En una comparación económica entre el valor de la carga que posee el vidrio de desecho en su composición para la obtención de matas de cobre y su carga referencial, se nota un ahorro del 18,66%, debido a que al sustituir el sílice por el vidrio se utiliza un reactivo de menor valor y se reduce el consumo de bórax y carbonato de sodio.

4.2 RECOMENDACIONES

- Se deben realizar pruebas con cantidades significativas de concentrado para poder ver una buena sedimentación y agrupación del cobre metálico.
- Se debe tratar de mantener en buenas condiciones el refractario del horno de crisoles para mantener una buena temperatura.
- Se debe poner un manómetro para el aire que ingresa al horno para saber a ciencia cierta la alimentación de oxígeno.
- Se deben recoger las escorias para hacer un análisis de pérdidas de cobre y plantar una alternativa de recuperación.
- Se debe acoplar un convertidor que tenga aireadores y un sedimentador para la correcta obtención de cobre blíster.
- Se debería comenzar por analizar en un diagrama ternario la composición de la carga fundente, basándose en la determinación de una carga fundente estequiométrica.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abbott, M. M. y Vanness, H. C., 1991, "Termodinámica", 2da Edición, Editorial Mc. Graw Hill, México, pp. 262,277-284.
2. Acevedo, R. y Montes-Atenas, G., 2004, "Hacia un Enfoque Dinámico de la Físico-Química ", Volumen II, Universidad de Chile, <http://cabierta.uchile.cl/revista/28/articulos/pdf/libro2.pdf>, (Marzo 2010).
3. Balzhiser, R. E., Samuels, M. R. y Eliassen, J. D., 1974, "Termodinámica química para ingenieros", Editorial Prentice-Hall Internacional, New Jersey, Estados Unidos, pp. 402-408, 459, 461, 500-506.
4. Callister, W. D., 1998 "Ciencia e ingeniería de los materiales", Editorial Reverté, Barcelona, España, pp. 60-61.
5. Castells, X. E., 2009, "Reciclaje de residuos industriales: residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora", 2da Edición, Ediciones Díaz de Santos. SA, Madrid, España, p. 467.
6. Chamorro J, "Diagramas de ellingham", <http://www.metalurgia.uda.cl/apuntes/Jchamorro/termodinamica/Diagramas%20de%20Ellingham.pdf>, (Enero 2010).
7. Chang, R., 2002, "Química", 7ma. Edición, Mc Graw Hill, México, pp. 442-443.
8. Cisternas L., "Productos derivados de minerales metálicos: Cobre", <http://www.uantof.cl/d2p/Ph.%20D.%20Luis%20Cisternas/Subjects/Technologies/Capitulo5.PDF>, (Febrero 2010).

9. Colón, H., 2002, "Fuerzas intermoleculares de líquidos y sólidos", http://bc.inter.edu/LinkClick.aspx?link=RE%2FH%C3%A9ctor+Col%C3%B3n%2FQUIM+Qu%C3%ADmica+Inorg%C3%A1nica%2FQuimicaGeneral_II_Cap_11a.pdf&tabid=733&mid=1375.pdf, (Abril, 2010)
10. Comisión Nacional del Medio Ambiente-Región Metropolitana, 1999, Fabricación de vidrio y de productos de vidrio, Guía para el control y prevención de la contaminación industrial, Santiago, Chile, p. 4.
11. Correa, J., 2002, "Fusión de concentrados auríferos", Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico, EPN, Quito, Ecuador, pp. 34-56.
12. Da Costa, A., 1998, "Termodinámica aplicada a aciaria", <http://www.equilibrium.trix.net/parte6.PDF>, (Julio 2010)
13. Davenport, W. G., King, M., Schlesinger, M. y Biswas, A. K., 2002, "Extractive Metallurgy of Copper", 4th edition, Elsevier science Ltd, Oxford, pp. 57-67.
14. De la Torre, E. y Guevara, A., 2005, "Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados", Editorial Pontificia Universidad Católica de Perú Ebook, Lima, Perú, pp. 2-6.
15. Del Castillo, F., 1993, "Obtención de cobre blíster a partir de un concentrado bulk", Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico, EPN, Quito, Ecuador, pp. 29-45.
16. Estudios mineros del Perú, "Manual de minería", http://www.estudiosmineros.com/ManualMineria/Manual_Mineria.pdf, (Febrero 2010)

17. Fernández, N. J., 2003, "El Vidrio", 3ra Edición, Consejo de Investigaciones Científicas, Madrid, España, pp. 47-51, 65, 148, 337.
18. Gálvez, C. y Mata, A., "Reciclaje de vidrio", <http://genesis.uag.mx/posgrado/revistaelect/calidad/cal010.pdf>, (Septiembre 2010).
19. Gilchrist J.D., 1989, "Extraction metallurgy", 3ra. Edition, Pergamon Press, The University of Newcastle, pp115-126, 257-273.
20. Grundy, A., Nemna, S., Decterov, S. y Pelton, A., 2006, "Thermodynamic optimization of the CaO-B₂O₃-SiO₂ system", http://www.crct.polymtl.ca/factsage/posters/factsage_poster2.pdf, (Junio, 2010).
21. Infoecologia, 2011, "El reciclado de vidrio", <http://www.infoecologia.com/Reciclaje/reciclaje.htm>, (enero 2011).
22. Iza, J., 2011, "Estudio para el mejoramiento de la fusión de calcinas auríferas con el uso de carbonato de calcio en la carga fundente", Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico, EPN, Quito, Ecuador.
23. Kelly, E. T. y Spottiswood, D. G., 1990, "Introducción al procesamiento de minerales", 1ra. edición, Editorial Limusa, México D.F., México, pp. 459-466.
24. Kubaschewski O. y Alcock C. B., 1979, "Metallurgical Thermo Chemistry", 5th. Edition, Pergamon press, Toronto, Canada, pp. 30-31, 45-47.
25. Lenahan, W.C. y Murray-Smith, R., 1997, "Assay and analytical practice in the South African mining industry", Editorial CTP, Johannesburg, South Africa, pp. 49, 55.

26. Lovera, A., Núñez, P. y Delgado, E., 2002, "Tostación de minerales sulfurados", Revista de la Facultad de Minería del Perú, pp. 9-10, 24
27. Lozada, D., 2006, "Diseño de escorias para la pirometalúrgica del oro y la plata", Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico, EPN, Quito, Ecuador, pp. 18, 21.
28. Lozada, M., 2004, "Estudio del procesamiento de minerales polisulfurados metálicos portadores de oro y plata", P-BID 099, Informe final, Quito
29. Maron, S. y Prutton, C., 1996, "Fundamentos de Fisicoquímica", Editorial Limusa, México D.F, México, pp. 172, 188.
30. Marsden, J. y House, L., 1993, "The chemistry of gold extraction", Editorial Ellis Horwood Limited, England, pp.456-478.
31. Pehlke, R., 1984, "Unit Process of Extractive Metallurgy", Elsevier science publishing Co. Inc, New York, pp. 39-42.
32. Restrepo, O., 1998, "Discusión general de los diagramas de fase", <http://www.unalmed.edu.co/~cpgarcia/diagramasfases.pdf>, (Enero, 2011).
33. Rovira y Pereira, 1982, "Metalurgia General", 2da. Edición, Editorial Dossat, Madrid, pp. 89-99.
34. Sánchez, M., 2002, "Pirometalúrgica del Cobre y Comportamiento de Sistemas Fundidos", Universidad de Concepción, pp. 1-8, 21-26.
35. Sanz, L. E., 2005, "El vidrio como materia escultórica: técnicas de fusión, termoformado, casting y pasta de vidrio", Memoria para optar al grado de doctor, Universidad Complutense de Madrid, España, pp 84-96.

36. Smith, W. F., 1998, "Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales", 3ra. Edición, Mc Graw Gill, Madrid, pp. 540-549.
37. Tantaleán, V. G., 1990, "Metalurgia del Cobre", http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/libros/geologia/recur_metal/pag146_169.pdf, (Septiembre 2010).
38. Vitro 2011, "Historia del vidrio" http://www.vitro.com/vidrio_plano/espanol/Biblioteca_711_4.htm. (Febrero 2011)
39. Wiley J, 1983, "Enciclopedia de Tecnología Química", 3ra. Edición, Interscience, New York, U.S.A.
40. Young, R., 1998, "Analysis for gold", Victoria, B.C., Canada, 3 (3), 46. <http://www.topnews.in/expert-analysis-gold-and-silver-futures-trading-2200863.pdf>, (Enero, 2010)

ANEXOS

ANEXO I

Caracterización física del desecho de vidrio y los concentrados polisulfurados

Muestra: Vidrio Molido

Condiciones de Operación:

Peso de la muestra: 250 g

Tiempo: 15 min

N° tamices: 14

En la tabla A1, se muestra la distribución del tamaño de partícula del mineral polisulfurado de Pacto.

Tabla A1. Distribución del tamaño de partícula para el mineral de Pacto

Malla	Abertura de malla	Peso retenido	Peso ret. Acum	% Peso ret.	% Ret. Acum
10	2 000	32,8	32,8	13,12	13,12
20	850	33,3	66,1	13,32	26,44
30	600	29,9	96,0	11,96	38,40
40	425	24,5	120,5	9,80	48,20
50	300	38,1	158,1	15,24	63,24
60	250	13,5	172,1	5,40	68,84
70	210	10,5	182,6	4,20	73,04
80	180	8,6	191,2	3,44	76,48
100	150	8,7	199,9	3,48	79,96
150	106	15,3	215,2	6,12	86,08
200	75	6,9	222,1	2,76	88,84
270	53	5,9	228,0	2,36	91,20
325	45	2,8	230,8	1,12	92,32
400	38	2,4	233,2	0,96	93,28

Con los resultados obtenidos del tratamiento de los datos se grafica el porcentaje retenido acumulado en función de la abertura del tamiz, para determinar gráficamente el tamaño de partícula d80 como se aprecia en la figura A1.

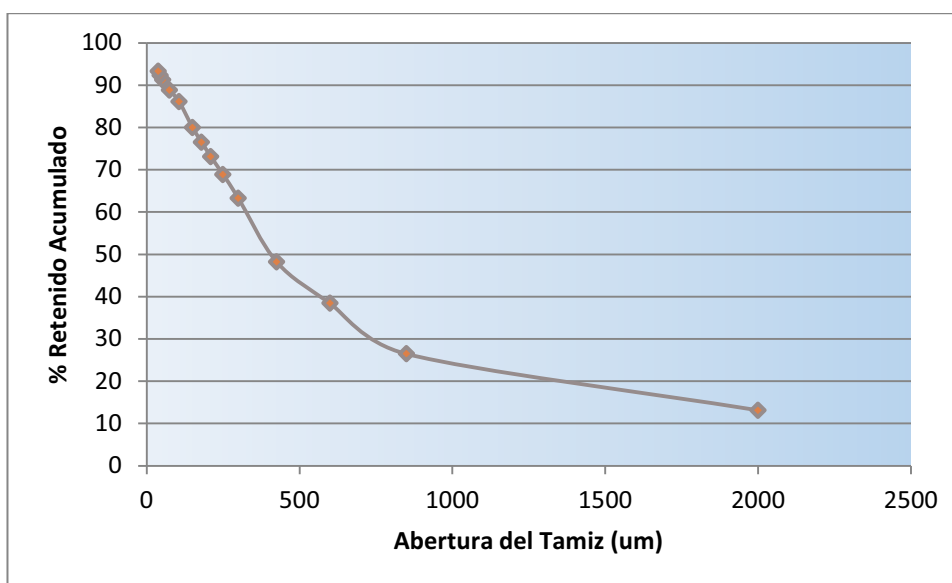


Figura A1. Porcentaje retenido acumulado vs abertura del tamiz.

En la tabla A2 se presenta el valor de d80 del mineral de Pacto.

Tabla A2. Parámetros definidos en el ensayo granulométrico para determinar el d80 del mineral de Pacto.

Parámetro	Valor	Unidad
d80	1 154	µm

ANEXO II

Pruebas de ensayo al fuego ejemplo de cálculo

Para el concentrado polisulfurado de Pacto, ensayo de referencia.

Peso de dore: 0,06577

Peso de oro: 0,01109

Peso de la plata: Peso de dore - Peso de oro= 0,05468

Cálculos de los g/TM de Oro que tiene la muestra:

$$\frac{g \text{ de Au}}{TM \text{ de mineral}} = \frac{0.01109 \text{ g de Au}}{30 \text{ g de mineral}} * \frac{1*10^6 \text{ g de mineral}}{1 TM \text{ de mineral}} = 369,67 \frac{g}{TM} \quad [A1]$$

$$\frac{g}{TM} = ppm \quad [A2]$$

$$369,67 \frac{g}{TM} = 369,67 ppm \quad [A3]$$

Cálculos de los g/TM de Plata que tiene la muestra:

$$\frac{g \text{ de Ag}}{TM \text{ de mineral}} = \frac{0.05468 \text{ g de Ag}}{30 \text{ g de mineral}} * \frac{1*10^6 \text{ g de mineral}}{1 TM \text{ de mineral}} = 1 822,6 \frac{g}{TM} \quad [A4]$$

Porcentaje de de Oro y Plata en el mineral de pacto

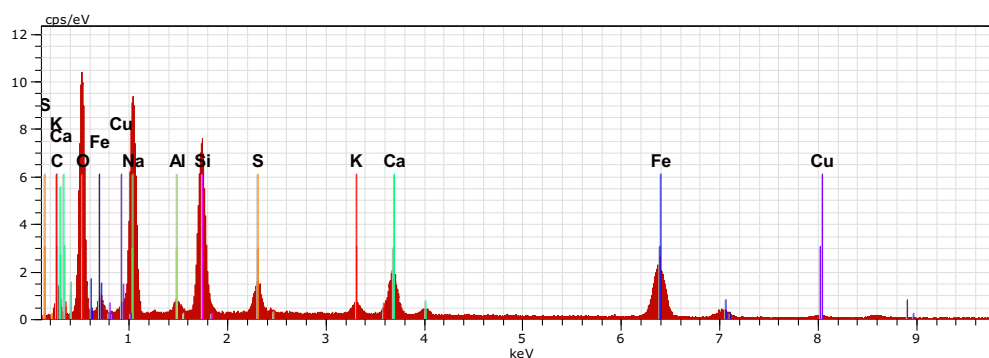
$$Au = 369,67 ppm$$

$$Ag = 1 822,6 ppm$$

ANEXO III

Composiciones de matas y escorias analizadas por microscopia electrónica de barrido

A continuación se presenta una serie de figuras obtenidas en el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).



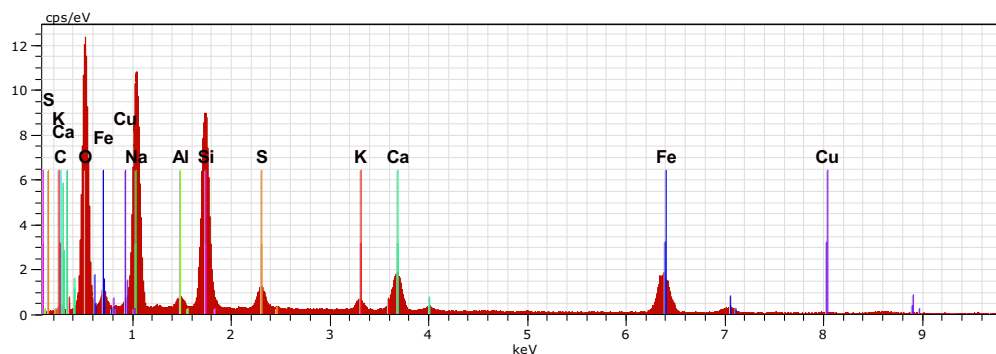
Muestra EE2 1 Fecha:9/20/2010 5:21:59 PMHV:20.0kV D. imp.:4.96kcps

El AN Series un. C norm. C Atom. C Compound Comp. C norm. Comp. C Error
 [wt.%) [wt.%) [at.%) [wt.%) [wt.%) [wt.%)

Na 11 K-series	17.99	24.12	23.77	24.12	17.99	1.2
Fe 26 K-series	16.23	21.77	8.83	21.77	16.23	0.5
C 6 K-series	12.87	17.26	32.56	17.26	12.87	2.2
O 8 K-series	9.66	12.95	18.34	0.00	0.00	0.4
Si 14 K-series	8.48	11.37	9.17	SiO2 24.32	18.14	0.4
Ca 20 K-series	4.56	6.11	3.46	6.11	4.56	0.2
S 16 K-series	1.75	2.34	1.65	2.34	1.75	0.1
Cu 29 K-series	1.34	1.80	0.64	1.80	1.34	0.1
K 19 K-series	0.97	1.30	0.75	1.30	0.97	0.1
Al 13 K-series	0.72	0.96	0.81	0.96	0.72	0.1

Total: 74.57 100.00 100.00

Figura A2.Caracterización química de fase escoria, ensayo 1.



Muestra EE3 1 Fecha:9/20/2010 5:31:47 PMHV:20.0kV D. imp.:5.41kcps

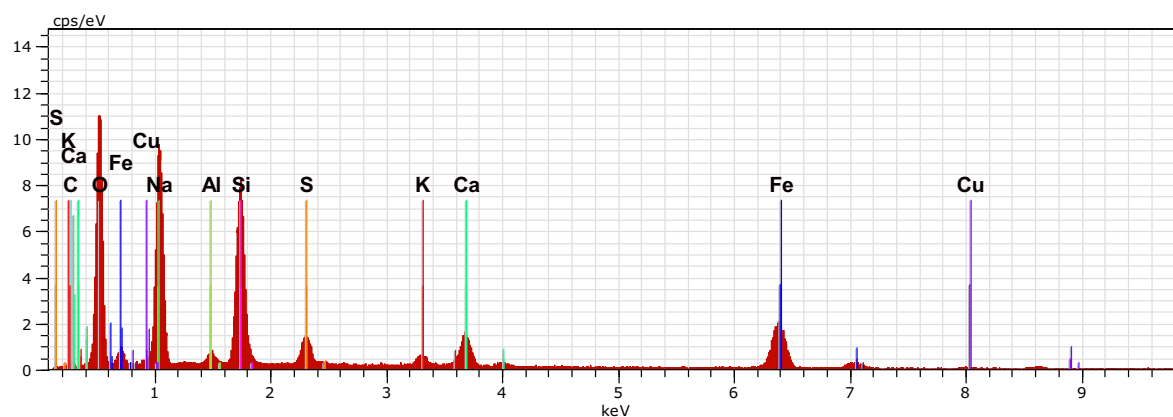
El AN Series un. C norm. C Atom. C Compound Comp. C norm. Comp. C Error

[wt.%) [wt.%) [at.%) [wt.%) [wt.%) [wt.%)

Na 11 K-series	24.83	31.17	33.56	31.17	24.83	1.6
O 8 K-series	14.98	18.80	29.08	0.00	0.00	0.7
Fe 26 K-series	14.43	18.11	8.03	18.11	14.43	0.4
Si 14 K-series	13.14	16.50	14.54	SiO2 35.29	28.12	0.6
Ca 20 K-series	5.16	6.47	4.00	6.47	5.16	0.2
C 6 K-series	2.57	3.23	6.65	3.23	2.57	0.8
S 16 K-series	1.89	2.37	1.83	2.37	1.89	0.1
K 19 K-series	1.08	1.35	0.86	1.35	1.08	0.1
Al 13 K-series	1.01	1.27	1.16	1.27	1.01	0.1
Cu 29 K-series	0.58	0.73	0.29	0.73	0.58	0.1

Total: 79.68 100.00 100.00

Figura A3.Caracterización química de fase escoria, ensayo 2.



Muestra EE4 1 Fecha:9/20/2010 5:35:26 PMHV:20.0kV D. imp.:4.76kcps

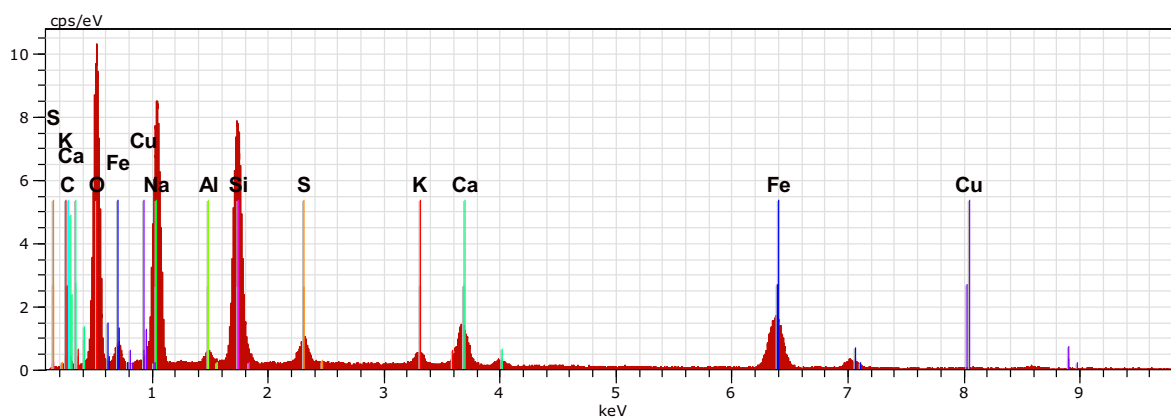
El AN Series unn. C norm. C Atom. C Compound Comp. C norm. Comp. C Error

[wt.%] [wt.%] [at.%] [wt.%] [wt.%] [wt.%]

Na 11 K-series	22.66	29.54	32.45	29.54	22.66	1.5
Fe 26 K-series	16.62	21.67	9.80	21.67	16.62	0.5
O 8 K-series	13.27	17.31	27.32	0.00	0.00	0.6
Si 14 K-series	11.65	15.19	13.66	SiO2 32.49	24.92	0.5
Ca 20 K-series	4.37	5.70	3.59	5.70	4.37	0.2
C 6 K-series	3.02	3.94	8.29	3.94	3.02	0.8
S 16 K-series	2.39	3.12	2.46	3.12	2.39	0.1
K 19 K-series	1.15	1.50	0.97	1.50	1.15	0.1
Al 13 K-series	0.94	1.23	1.15	1.23	0.94	0.1
Cu 29 K-series	0.62	0.81	0.32	0.81	0.62	0.1

Total: 76.70 100.00 100.00

Figura A4.Caracterización química de fase escoria, ensayo 3.



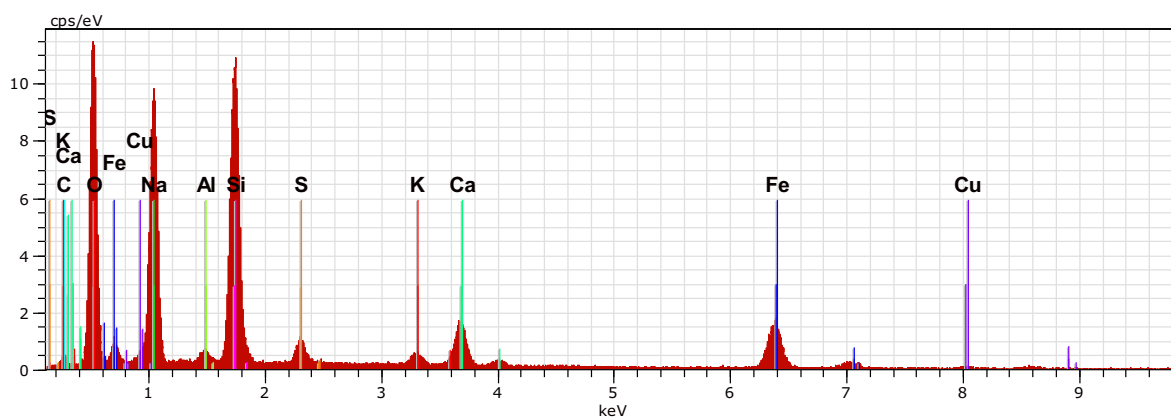
Muestra EE5 1 Fecha:9/20/2010 5:39:40 PMHV:20.0kV D. imp.:4.23kcps

El AN Series unn. C norm. C Atom. C Compound Comp. C norm. Comp. C Error
 [wt.%] [wt.%] [at.%] [wt.%] [wt.%] [wt.%]

Na 11 K-series	21.43	27.60	28.51	27.60	21.43	1.4
Fe 26 K-series	15.40	19.83	8.43	19.83	15.40	0.5
O 8 K-series	13.95	17.97	26.67	0.00	0.00	0.6
Si 14 K-series	12.24	15.77	13.34	SiO2 33.74	26.19	0.6
C 6 K-series	6.39	8.23	16.27	8.23	6.39	1.4
Ca 20 K-series	4.40	5.67	3.36	5.67	4.40	0.2
S 16 K-series	1.63	2.10	1.56	2.10	1.63	0.1
K 19 K-series	1.07	1.38	0.84	1.38	1.07	0.1
Al 13 K-series	0.74	0.95	0.84	0.95	0.74	0.1
Cu 29 K-series	0.37	0.48	0.18	0.48	0.37	0.1

Total: 77.63 100.00 100.00

Figura A5.Caracterización química de fase escoria, ensayo 4.



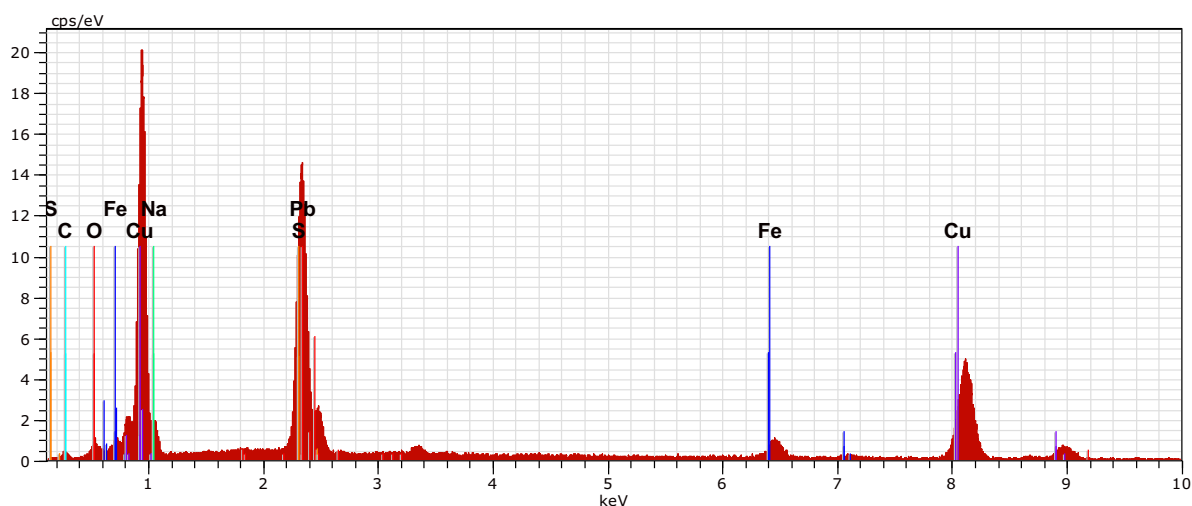
Muestra EE6 1 Fecha:9/20/2010 5:46:48 PMHV:20.0kV D. imp.:5.20kcp

El AN Series un. C norm. C Atom. C Compound Comp. C norm. Comp. C Error
 [wt.%) [wt.%) [at.%) [wt.%) [wt.%) [wt.%)

Na 11 K-series	22.80	27.63	28.90	27.63	22.80	1.5
O 8 K-series	18.18	22.03	33.11	0.00	0.00	0.8
Si 14 K-series	15.96	19.34	16.56	SiO2 41.37	34.13	0.7
Fe 26 K-series	13.11	15.89	6.84	15.89	13.11	0.4
Ca 20 K-series	4.86	5.89	3.53	5.89	4.86	0.2
C 6 K-series	3.05	3.69	7.39	3.69	3.05	0.9
S 16 K-series	1.66	2.02	1.51	2.02	1.66	0.1
K 19 K-series	1.08	1.31	0.80	1.31	1.08	0.1
Cu 29 K-series	0.99	1.20	0.46	1.20	0.99	0.1
Al 13 K-series	0.83	1.01	0.90	1.01	0.83	0.1

Total: 82.52 100.00 100.00

Figura A6. Caracterización química de fase escoria, ensayo 5.



Muestra EM2 1 Fecha:9/20/2010 5:59:45 PMHV:20.0kV D. imp.:7.84kcps

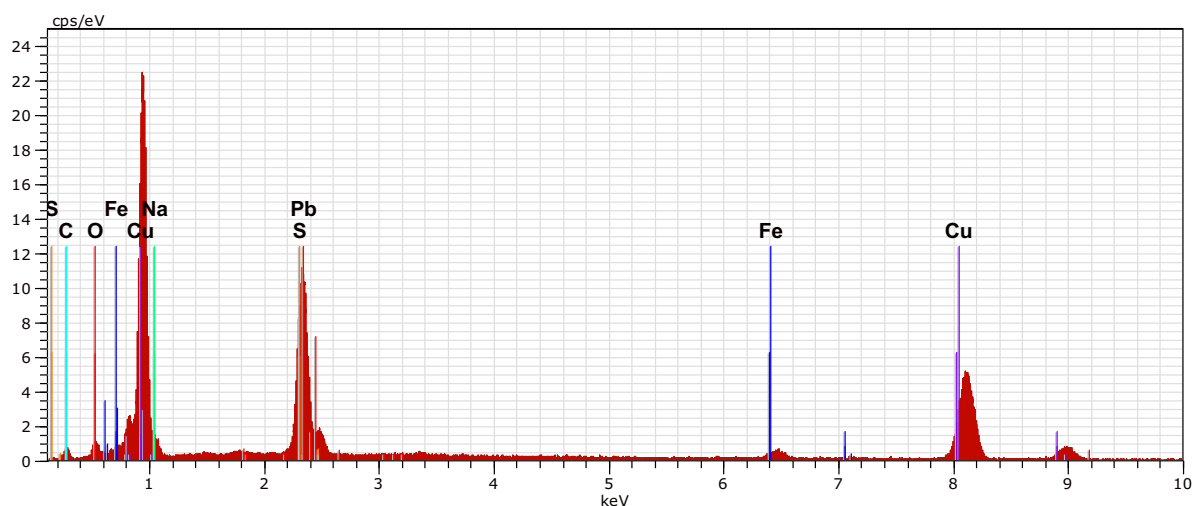
El AN Series un. C norm. C Atom. C Error

[wt.%] [wt.%] [at.%] [wt.%]

	[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Cu 29 K-series	46.22	42.18	36.06	1.3
Pb 82 M-series	35.31	32.22	8.45	1.3
S 16 K-series	12.26	11.18	18.95	0.5
Na 11 K-series	5.64	5.15	12.16	0.4
Fe 26 K-series	4.39	4.00	3.89	0.2
O 8 K-series	3.22	2.94	9.97	0.7
C 6 K-series	2.55	2.33	10.53	0.6

Total: 109.58 100.00 100.00

Figura A7.Caracterización química de fase mata, ensayo 6.



Muestra EM3 1 Fecha:9/20/2010 6:07:01 PMHV:20.0kV D. imp.:7.37kcps

El AN Series un. C norm. C Atom. C Error

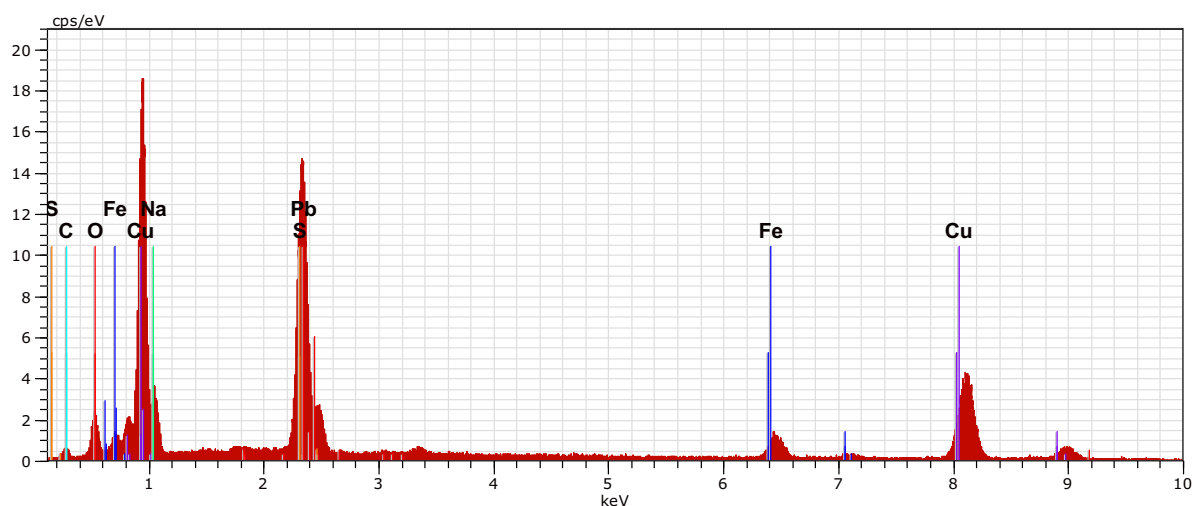
[wt.%) [wt.%) [at.%) [wt.%)

```

-----
Cu 29 K-series  52.28  50.71  38.55  1.5
Pb 82 M-series  25.29  24.54   5.72  0.9
S 16 K-series   10.39  10.08  15.19  0.4
C  6 K-series    4.68   4.54  18.27  1.0
O  8 K-series    4.22   4.09  12.35  0.8
Na 11 K-series   3.92   3.80   7.98  0.3
Fe 26 K-series   2.30   2.24   1.93  0.1
  
```

Total: 103.08 100.00 100.00

Figura A8.Caracterización química de fase mata, ensayo 7.



Muestra EM4 1 Fecha:9/20/2010 6:11:55 PMHV:20.0kV D. imp.:8.10kcps

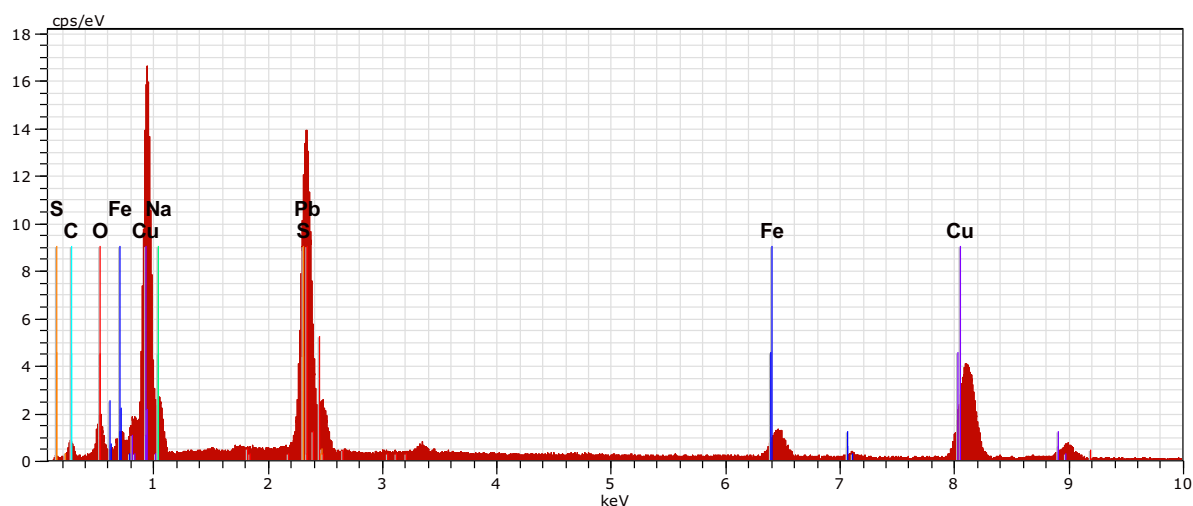
El AN Series un. C norm. C Atom. C Error

[wt.%) [wt.%) [at.%) [wt.%)

	[wt.%)	[wt.%)	[at.%)	[wt.%)
Cu 29 K-series	40.64	36.40	26.26	1.2
Pb 82 M-series	33.80	30.27	6.70	1.3
S 16 K-series	11.65	10.43	14.91	0.5
Na 11 K-series	8.49	7.60	15.17	0.6
O 8 K-series	8.48	7.59	21.75	1.4
Fe 26 K-series	5.30	4.74	3.90	0.2
C 6 K-series	3.31	2.96	11.32	0.7

Total: 111.67 100.00 100.00

Figura A945.Caracterización química de fase mata, ensayo 8.



Muestra EM5 1 Fecha:9/20/2010 6:15:08 PMHV:20.0kV D. imp.:7.61kcps

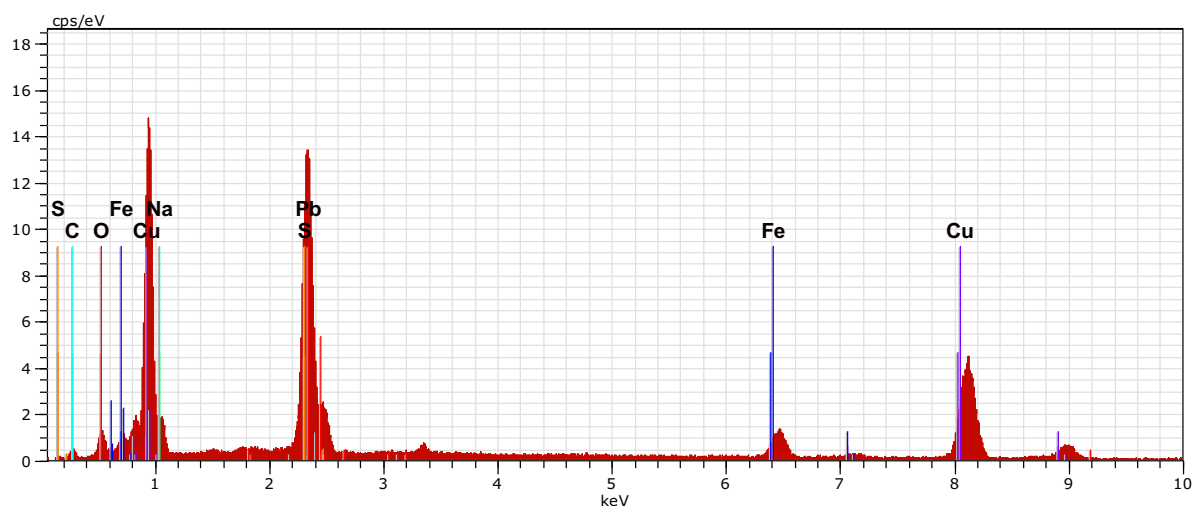
El AN Series un. C norm. C Atom. C Error

[wt.%) [wt.%) [at.%) [wt.%)

	[wt.%)	[wt.%)	[at.%)	[wt.%)
Cu 29 K-series	41.71	37.95	27.33	1.2
Pb 82 M-series	32.05	29.16	6.44	1.2
S 16 K-series	11.55	10.51	15.00	0.4
Na 11 K-series	7.12	6.48	12.89	0.5
O 8 K-series	6.96	6.33	18.11	1.2
Fe 26 K-series	5.96	5.42	4.44	0.2
C 6 K-series	4.55	4.14	15.79	0.9

Total: 109.90 100.00 100.00

Figura A10.Caracterización química de fase mata, ensayo 9.



Muestra EM6 1 Fecha:9/20/2010 6:17:54 PMHV:20.0kV D. imp.:7.16kcps

El AN Series unn. C norm. C Atom. C Error

[wt.%) [wt.%) [at.%) [wt.%)

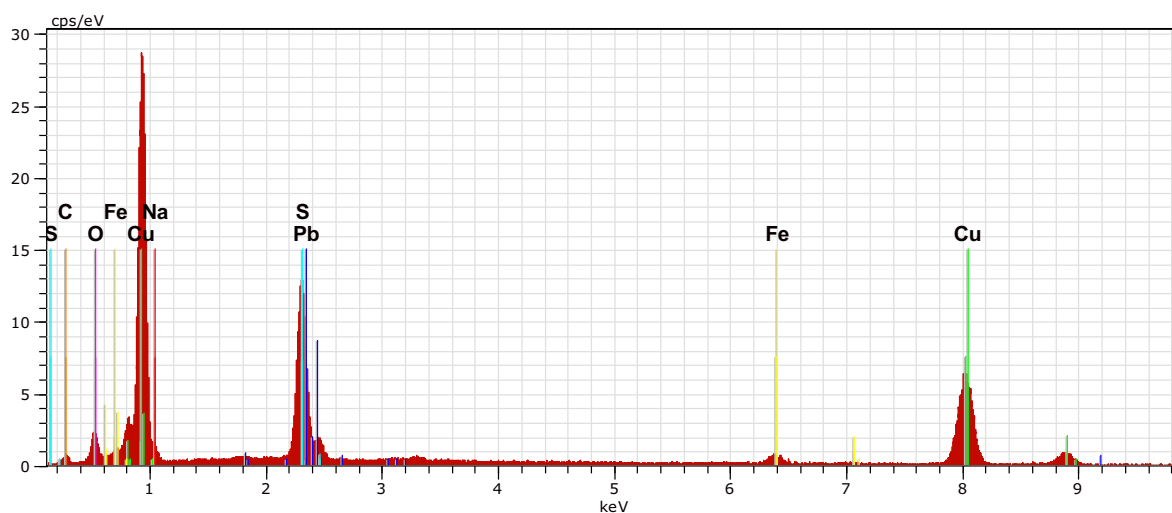
```

-----
Cu 29 K-series 46.00 40.38 32.78 1.3
Pb 82 M-series 35.24 30.94 7.70 1.3
S 16 K-series 12.28 10.78 17.34 0.5
Fe 26 K-series 6.56 5.76 5.32 0.2
Na 11 K-series 6.03 5.30 11.89 0.4
O 8 K-series 4.72 4.14 13.35 0.9
C 6 K-series 3.08 2.70 11.61 0.7

```

Total: 113.91 100.00 100.00

Figura A11.Caracterización química de fase mata, ensayo 10.



Muestra VM1 1 Fecha:9/24/2010 10:38:13 AM HV:20.0kV D. imp.:8.96kcps

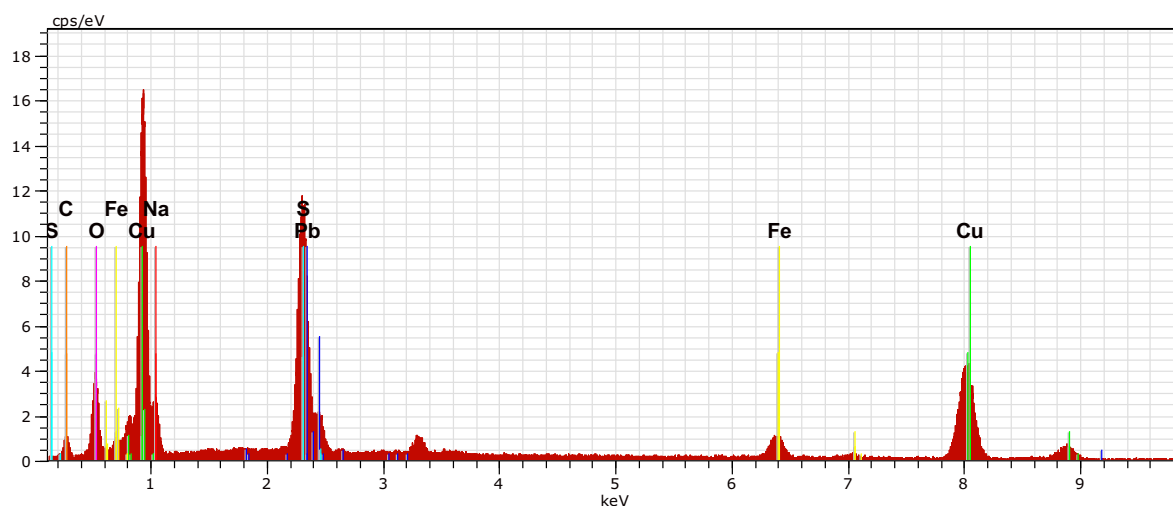
El AN Series un. C norm. C Atom. C Error

[wt.%) [wt.%) [at.%) [wt.%)

Cu 29 K-series	61.79	64.21	37.06	1.7
S 16 K-series	15.01	15.59	17.83	0.6
C 6 K-series	7.63	7.93	24.21	1.6
O 8 K-series	7.02	7.29	16.72	1.2
Fe 26 K-series	2.34	2.43	1.59	0.1
Na 11 K-series	1.45	1.51	2.41	0.1
Pb 82 M-series	1.00	1.04	0.18	0.1

Total: 96.23 100.00 100.00

Figura A12.Caracterización química de metal blanco de cobre, ensayo 11.



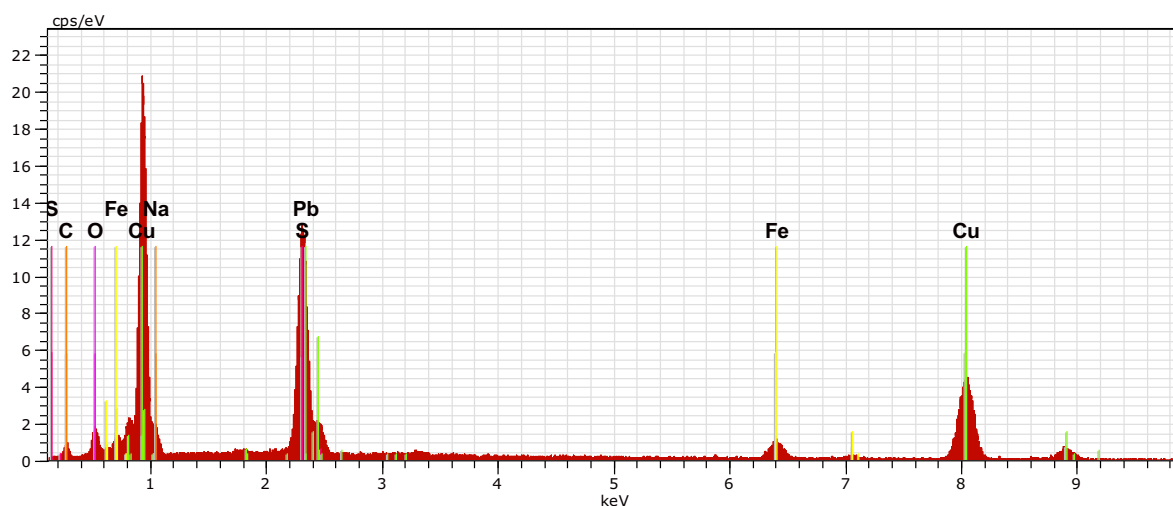
Muestra VM2 1 Fecha:9/24/2010 10:44:45 AM HV:20.0kV D. imp.:7.36kcps

El AN Series unn. C norm. C Atom. C Error
 [wt.%] [wt.%] [at.%] [wt.%]

Cu 29 K-series	46.93	48.75	23.71	1.3
S 16 K-series	13.86	14.40	13.87	0.5
O 8 K-series	12.71	13.20	25.50	1.8
C 6 K-series	9.79	10.17	26.17	1.8
Na 11 K-series	5.54	5.76	7.74	0.4
Fe 26 K-series	4.42	4.59	2.54	0.2
Pb 82 M-series	3.01	3.13	0.47	0.1

Total: 96.26 100.00 100.00

Figura A13.Caracterización química de fase mata, ensayo 12.



Muestra VE2 2 Fecha:9/24/2010 11:01:00 AM HV:20.0kV D. imp.:7.66kcps

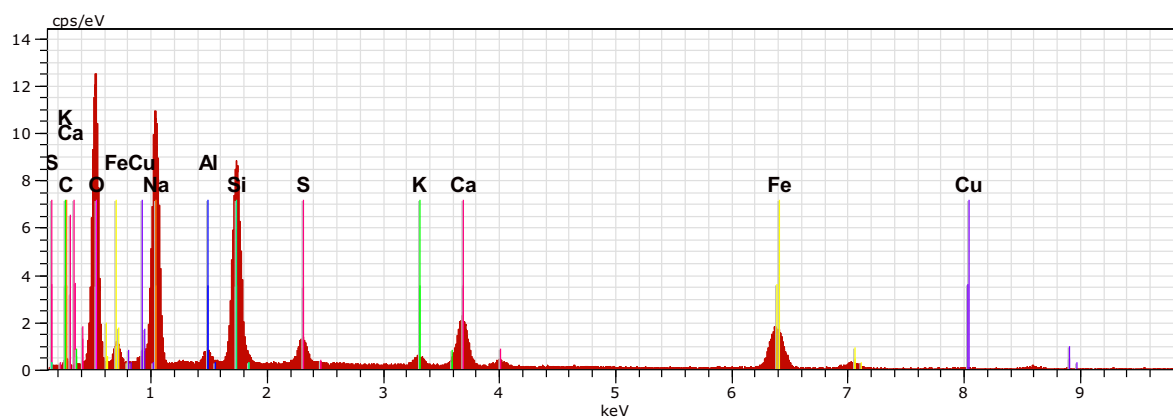
El AN Series un. C norm. C Atom. C Error

[wt.%) [wt.%) [at.%) [wt.%)

	[wt.%)	[wt.%)	[at.%)	[wt.%)
Cu 29 K-series	54.01	53.11	31.22	1.5
S 16 K-series	15.98	15.71	18.30	0.6
Pb 82 M-series	8.30	8.17	1.47	0.3
C 6 K-series	7.90	7.77	24.15	1.6
O 8 K-series	6.57	6.46	15.08	1.1
Fe 26 K-series	4.78	4.70	3.14	0.2
Na 11 K-series	4.16	4.09	6.64	0.3

Total: 101.70 100.00 100.00

Figura A14.Caracterización química de fase mata, ensayo 13.



Muestra VE1 1 Fecha:9/24/2010 11:04:08 AM HV:20.0kV D. imp.:5.21kcps

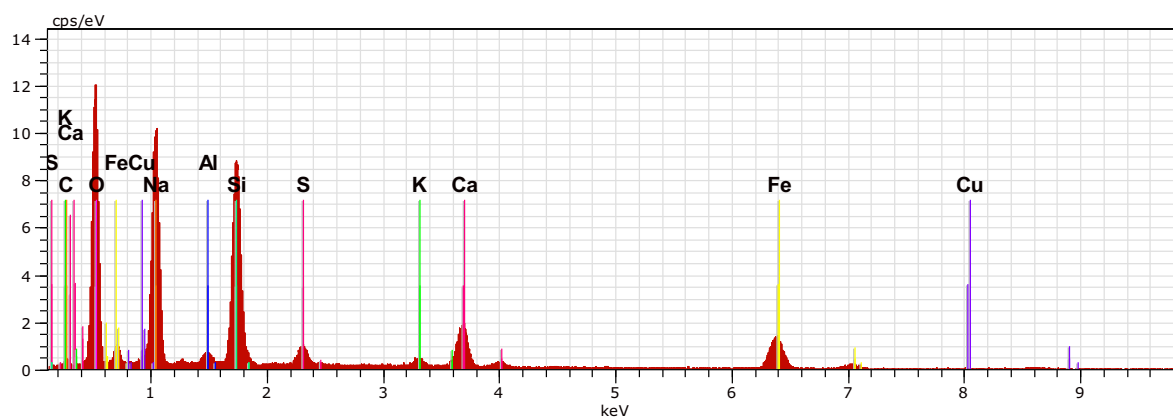
El AN Series unn. C norm. C Atom. C Compound Comp. C norm. Comp. C Error

[wt.%) [wt.%) [at.%) [wt.%) [wt.%) [wt.%)

Na 11 K-series	24.59	30.85	33.92		30.85	24.59	1.6
Fe 26 K-series	14.94	18.75	8.49		18.75	14.94	0.4
O 8 K-series	14.30	17.95	28.36		0.00	0.00	0.6
Si 14 K-series	12.55	15.75	14.18	SiO2	33.70	26.86	0.6
Ca 20 K-series	6.35	7.96	5.02		7.96	6.35	0.2
C 6 K-series	2.11	2.65	5.57		2.65	2.11	0.7
S 16 K-series	2.08	2.61	2.06		2.61	2.08	0.1
Al 13 K-series	1.05	1.32	1.23		1.32	1.05	0.1
K 19 K-series	0.99	1.25	0.81		1.25	0.99	0.1
Cu 29 K-series	0.73	0.92	0.36		0.92	0.73	0.1

Total: 79.70 100.00 100.00

Figura A15.Caracterización química de fase escoria, ensayo 14.



Muestra VE2 1 Fecha:9/24/2010 11:06:51 AM HV:20.0kV D. imp.:4.77kcps

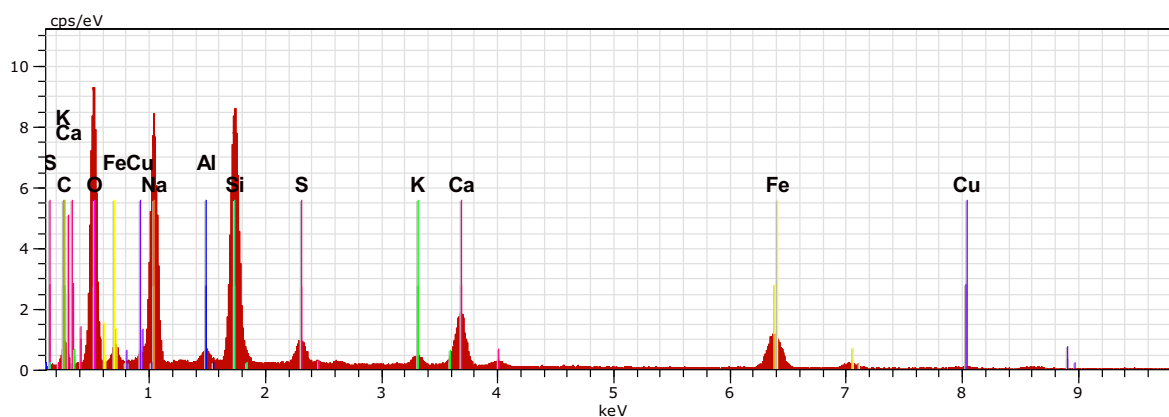
El AN Series un. C norm. C Atom. C Compound Comp. C norm. Comp. C Error

[wt.%) [wt.%) [at.%) [wt.%) [wt.%) [wt.%)

Na 11 K-series	25.42	30.71	32.63	30.71	25.42	1.7
O 8 K-series	16.48	19.91	30.40	0.00	0.00	0.7
Si 14 K-series	14.47	17.48	15.20	SiO2 37.39	30.95	0.6
Fe 26 K-series	13.14	15.88	6.94	15.88	13.14	0.4
Ca 20 K-series	6.41	7.75	4.72	7.75	6.41	0.2
C 6 K-series	2.52	3.04	6.19	3.04	2.52	0.8
S 16 K-series	1.89	2.29	1.74	2.29	1.89	0.1
Al 13 K-series	1.20	1.45	1.31	1.45	1.20	0.1
K 19 K-series	0.96	1.16	0.73	1.16	0.96	0.1
Cu 29 K-series	0.28	0.34	0.13	0.34	0.28	0.1

Total: 82.77 100.00 100.00

Figura A16.Caracterización química de fase escoria, ensayo 15.



Muestra VE3 1 Fecha:9/24/2010 11:10:09 AM HV:20.0kV D. imp.:4.19kcps

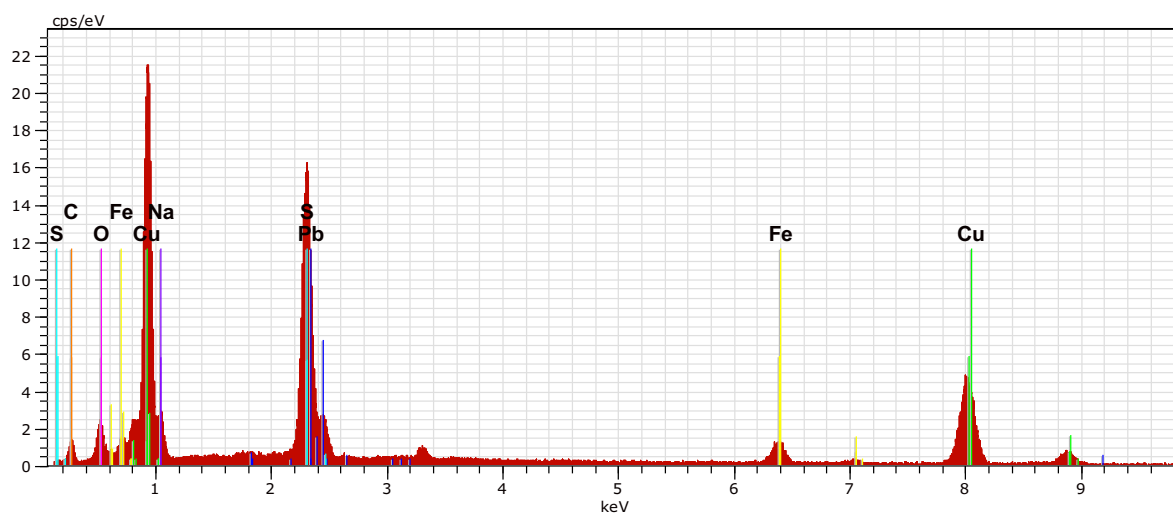
El AN Series unn. C norm. C Atom. C Compound Comp. C norm. Comp. C Error

[wt.%) [wt.%) [at.%) [wt.%) [wt.%) [wt.%)

Na 11 K-series	20.27	24.49	23.76	24.49	20.27	1.3
O 8 K-series	15.75	19.02	26.52	0.00	0.00	0.7
Si 14 K-series	13.82	16.70	13.26	SiO2 35.72	29.57	0.6
Fe 26 K-series	11.54	13.94	5.57	13.94	11.54	0.4
C 6 K-series	10.27	12.41	23.04	12.41	10.27	2.0
Ca 20 K-series	6.29	7.60	4.23	7.60	6.29	0.2
S 16 K-series	1.76	2.12	1.48	2.12	1.76	0.1
Cu 29 K-series	1.12	1.35	0.47	1.35	1.12	0.1
Al 13 K-series	0.98	1.19	0.98	1.19	0.98	0.1
K 19 K-series	0.98	1.18	0.68	1.18	0.98	0.1

Total: 82.80 100.00 100.00

Figura A17.Caracterización química de fase escoria, ensayo 16.



Muestra M2 1 Fecha:8/27/2010 10:45:35 AM HV:20.0kV D. imp.:8.99kcps

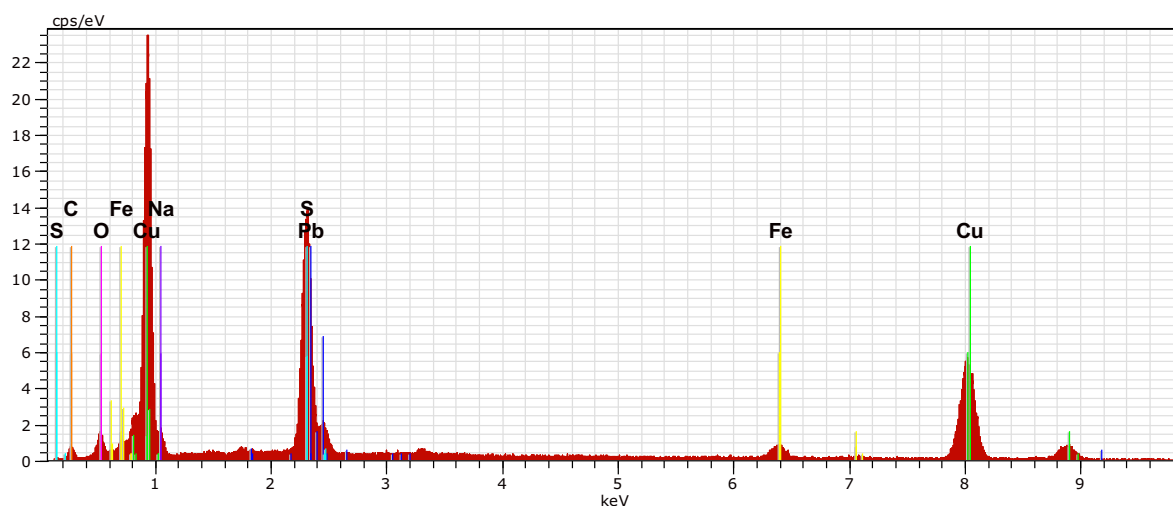
El AN Series unn. C norm. C Atom. C Compound Comp. C norm. Comp. C Error

[wt.%) [wt.%) [at.%) [wt.%) [wt.%) [wt.%)

	[wt.%)	[wt.%)	[at.%)	[wt.%)	[wt.%)	[wt.%)
Cu 29 K-series	43.20	47.96	23.57	47.96	43.20	1.2
S 16 K-series	16.46	18.27	17.80	18.27	16.46	0.6
C 6 K-series	11.19	12.42	32.30	12.42	11.19	2.1
O 8 K-series	7.48	8.30	16.21	8.30	7.48	1.2
Na 11 K-series	4.60	5.11	6.94	5.11	4.60	0.3
Fe 26 K-series	4.34	4.82	2.70	4.82	4.34	0.2
Pb 82 M-series	2.81	3.12	0.47	3.12	2.81	0.1

Total: 90.09 100.00 100.00

Figura A18.Caracterización química de fase mata, ensayo 17.



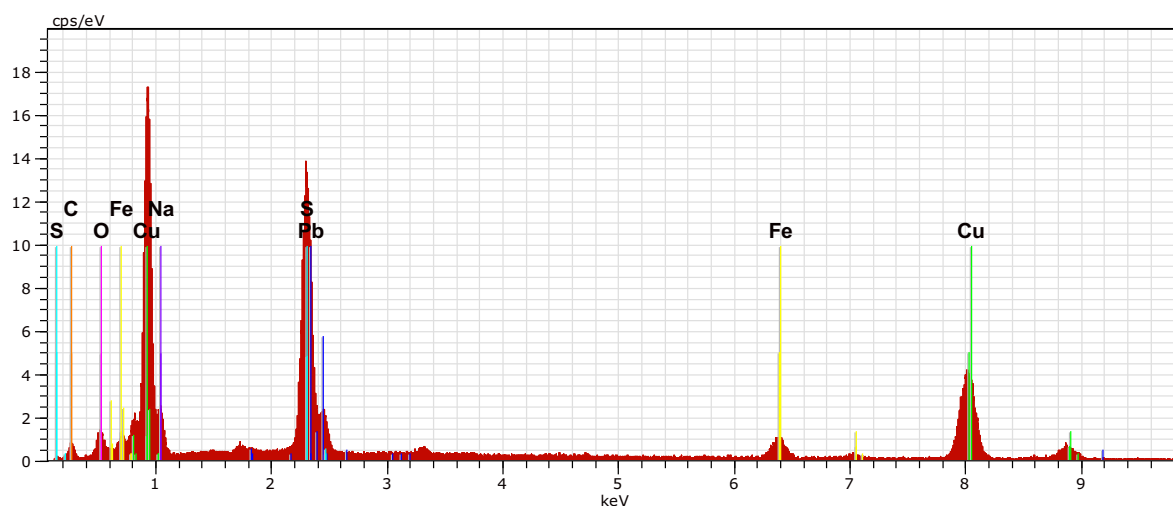
Muestra M3 1 Fecha:8/27/2010 10:52:19 AM HV:20.0kV D. imp.:8.22kcps

El AN Series un. C norm. C Atom. C Error
 [wt.%] [wt.%] [at.%] [wt.%]

Cu 29 K-series	58.34	61.19	35.84	1.6
S 16 K-series	17.09	17.92	20.80	0.6
C 6 K-series	7.74	8.12	25.16	1.6
O 8 K-series	4.70	4.93	11.46	0.9
Fe 26 K-series	3.13	3.28	2.19	0.1
Na 11 K-series	2.48	2.60	4.20	0.2
Pb 82 M-series	1.87	1.96	0.35	0.1

Total: 95.34 100.00 100.00

Figura A19.Caracterización química de fase mata, ensayo 18.



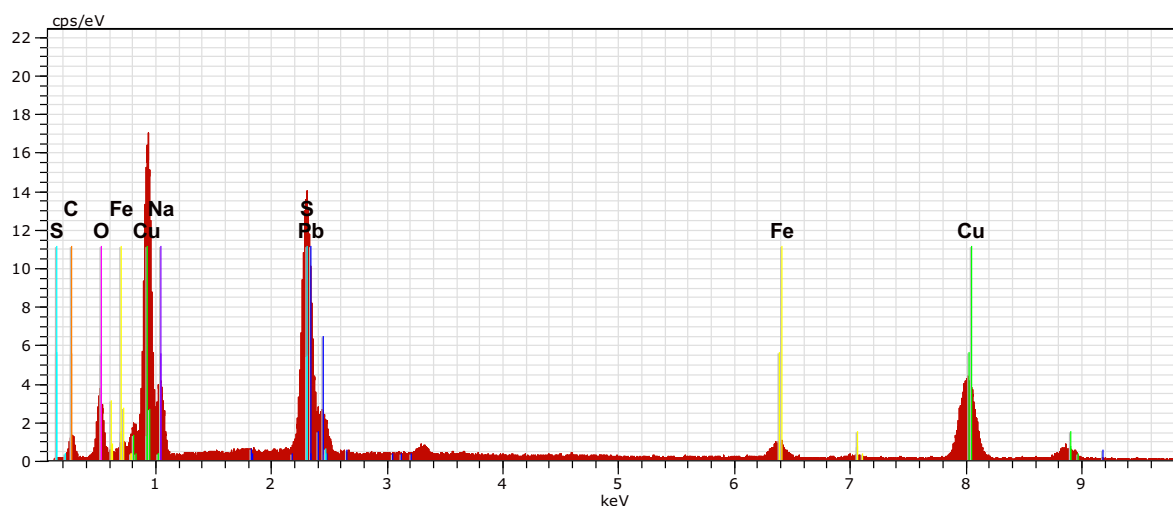
Muestra M4 2 Fecha:8/27/2010 10:55:06 AM HV:20.0kV D. imp.:7.36kcps

El AN Series unn. C norm. C Atom. C Error
 [wt.%] [wt.%] [at.%] [wt.%]

Cu 29 K-series	48.38	51.73	28.31	1.4
S 16 K-series	17.52	18.73	20.32	0.7
C 6 K-series	8.67	9.27	26.85	1.7
Na 11 K-series	5.28	5.64	8.54	0.4
O 8 K-series	5.22	5.58	12.12	0.9
Fe 26 K-series	4.83	5.16	3.21	0.2
Pb 82 M-series	3.62	3.87	0.65	0.2

Total: 93.52 100.00 100.00

Figura A20.Caracterización química de fase mata, ensayo 19.



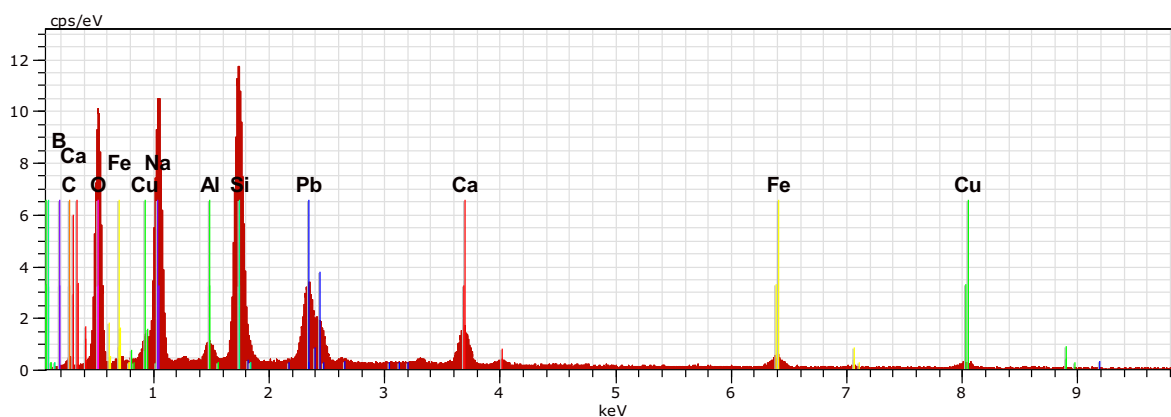
Muestra M5 3 Fecha:8/27/2010 10:58:42 AM HV:20.0kV D. imp.:7.88kcps

El AN Series unn. C norm. C Atom. C Error
 [wt.%) [wt.%) [at.%) [wt.%)

Cu 29 K-series	44.74	45.68	21.77	1.3
S 16 K-series	14.93	15.24	14.40	0.6
O 8 K-series	11.45	11.69	22.12	1.7
C 6 K-series	10.96	11.19	28.21	2.0
Na 11 K-series	8.04	8.21	10.82	0.6
Pb 82 M-series	4.08	4.17	0.61	0.2
Fe 26 K-series	3.75	3.83	2.08	0.1

Total: 97.95 100.00 100.00

Figura A21.Caracterización química de fase mata, ensayo 20.



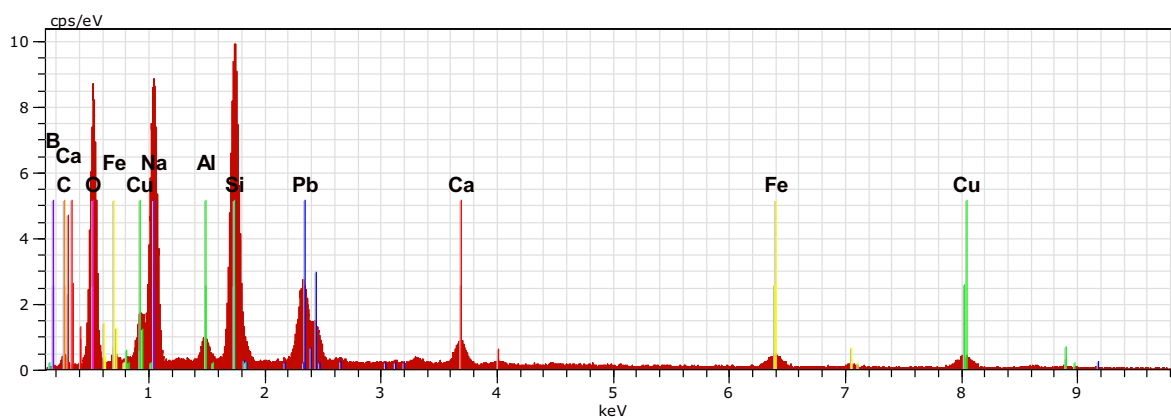
Muestra LV2 1 Fecha:8/27/2010 11:02:02 AM HV:20.0kV D. imp.:5.77kcps

El AN Series unn. C norm. C Atom. C Compound Comp. C norm. Comp. C Error
 [wt.%] [wt.%] [at.%] [wt.%] [wt.%] [wt.%]

Na 11 K-series	18.52	22.86	25.08	22.86	18.52	1.2
Pb 82 M-series	15.54	19.19	2.34	19.19	15.54	0.6
O 8 K-series	14.96	18.46	29.10	0.00	0.00	0.7
Si 14 K-series	13.13	16.20	14.55	SiO2 34.67	28.08	0.6
B 5 K-series	4.86	6.00	14.00	6.00	4.86	1.4
Ca 20 K-series	4.29	5.29	3.33	5.29	4.29	0.2
Cu 29 K-series	2.99	3.69	1.47	3.69	2.99	0.1
C 6 K-series	2.83	3.49	7.33	3.49	2.83	0.6
Fe 26 K-series	2.82	3.48	1.57	3.48	2.82	0.1
Al 13 K-series	1.08	1.33	1.24	1.33	1.08	0.1

Total: 81.02 100.00 100.00

Figura A22.Caracterización química de fase escoria, ensayo 21.



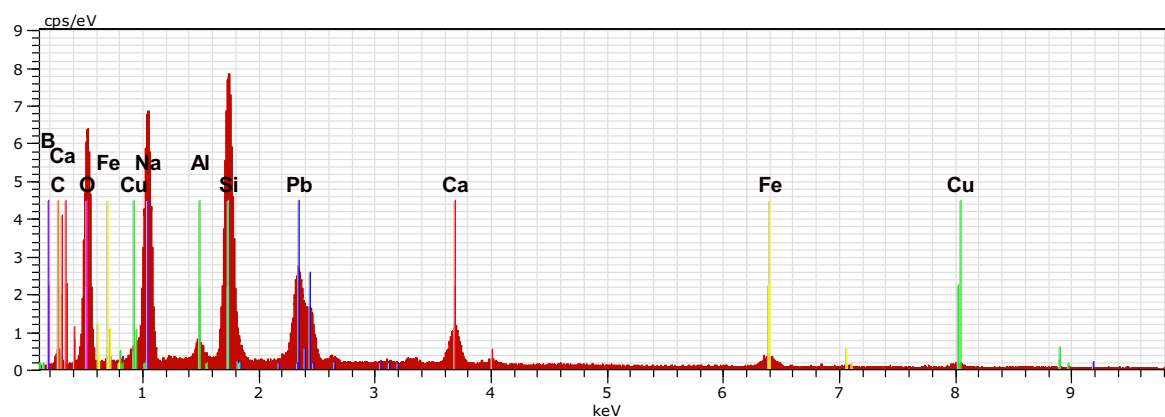
Muestra LV4 2 Fecha:8/27/2010 11:07:10 AM HV:20.0kV D. imp.:4.85kcps

El AN Series un. C norm. C Atom. C Compound Comp. C norm. Comp. C Error
 [wt.%) [wt.%) [at.%) [wt.%) [wt.%) [wt.%)

Na 11 K-series	19.39	22.97	24.95		22.97	19.39	1.3
O 8 K-series	15.37	18.21	28.42		0.00	0.00	0.7
Pb 82 M-series	14.26	16.90	2.04		16.90	14.26	0.5
Si 14 K-series	13.49	15.98	14.21	SiO2	34.19	28.85	0.6
Cu 29 K-series	6.26	7.42	2.92		7.42	6.26	0.2
B 5 K-series	5.02	5.95	13.75		5.95	5.02	1.5
C 6 K-series	3.57	4.24	8.81		4.24	3.57	0.8
Fe 26 K-series	3.39	4.02	1.80		4.02	3.39	0.1
Ca 20 K-series	2.48	2.93	1.83		2.93	2.48	0.1
Al 13 K-series	1.17	1.38	1.28		1.38	1.17	0.1

Total: 84.39 100.00 100.00

Figura A23. Caracterización química de fase escoria, ensayo 22.



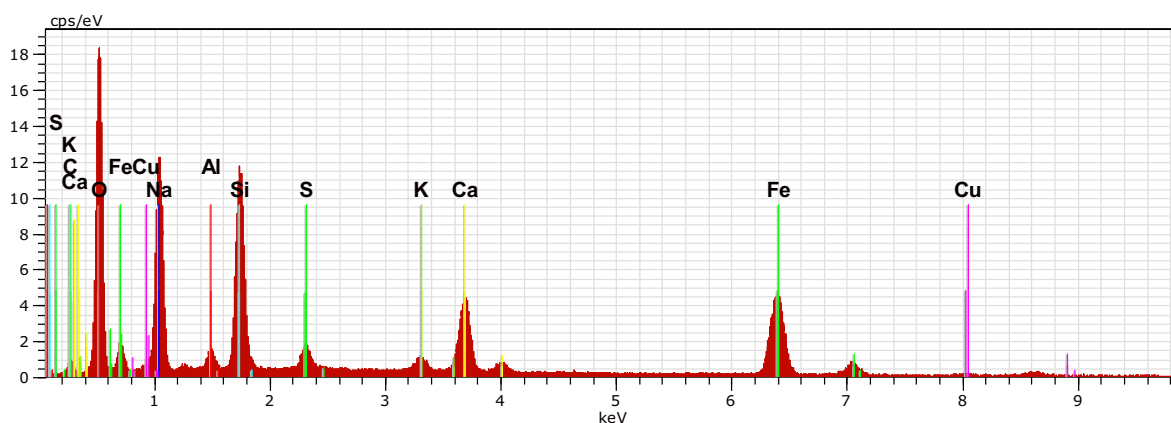
Muestra LV3 1 Fecha:8/27/2010 11:14:12 AM HV:20.0kV D. imp.:4.18kcps

El AN Series unn. C norm. C Atom. C Compound Comp. C norm. Comp. C Error
 [wt.%) [wt.%) [at.%) [wt.%) [wt.%) [wt.%)

Pb 82 M-series	16.41	21.74	2.61	21.74	16.41	0.6
Na 11 K-series	15.74	20.86	22.60	20.86	15.74	1.0
O 8 K-series	13.05	17.29	26.92	0.00	0.00	0.6
Si 14 K-series	11.45	15.17	13.46	SiO2 32.46	24.50	0.5
B 5 K-series	5.38	7.12	16.42	7.12	5.38	1.4
C 6 K-series	4.04	5.35	11.10	5.35	4.04	0.8
Ca 20 K-series	3.94	5.21	3.24	5.21	3.94	0.2
Fe 26 K-series	2.75	3.64	1.63	3.64	2.75	0.1
Cu 29 K-series	1.86	2.46	0.96	2.46	1.86	0.1
Al 13 K-series	0.86	1.15	1.06	1.15	0.86	0.1

Total: 75.48 100.00 100.00

Figura A24.Caracterización química de fase escoria, ensayo 23.



Muestra Fe-Mg-Si-INC 3 Fecha:9/8/2010 4:57:48 PM HV:20.0kV D. imp.:8.21kcps

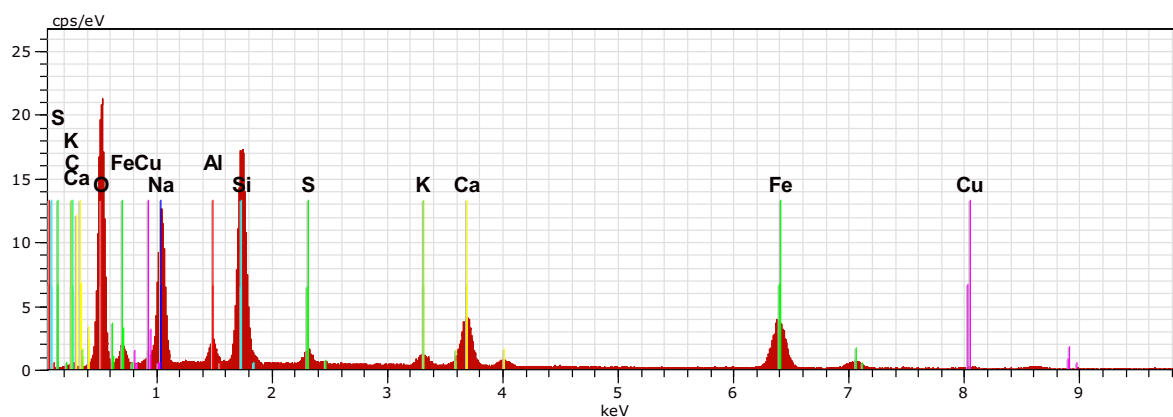
El AN Series un. C norm. C Atom. C Compound Comp. C norm. Comp. C Error

[wt.%) [wt.%) [at.%) [wt.%) [wt.%) [wt.%)

Fe 26 K-series	21.89	28.99	13.81	28.99	21.89	0.6
Na 11 K-series	17.71	23.45	27.14	23.45	17.71	1.2
O 8 K-series	10.57	14.00	23.28	0.00	0.00	0.5
Si 14 K-series	9.28	12.29	11.64	SiO2 26.29	19.85	0.4
Ca 20 K-series	7.23	9.57	6.36	9.57	7.23	0.2
C 6 K-series	4.60	6.09	13.49	6.09	4.60	1.1
S 16 K-series	1.35	1.78	1.48	1.78	1.35	0.1
Al 13 K-series	1.12	1.48	1.46	1.48	1.12	0.1
K 19 K-series	1.05	1.40	0.95	1.40	1.05	0.1
Cu 29 K-series	0.71	0.94	0.40	0.94	0.71	0.1

Total: 75.51 100.00 100.00

Figura A25.Caracterización química de fase escoria, ensayo 24.



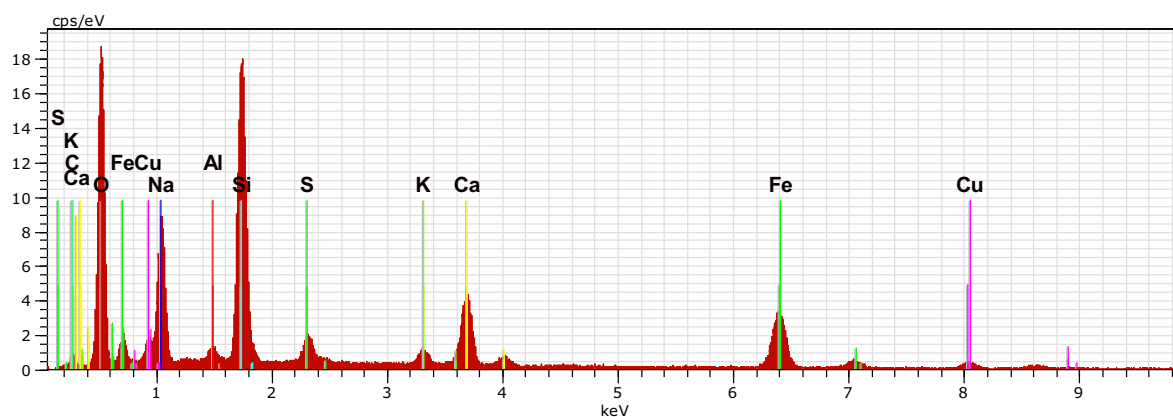
Muestra PM2 1 Fecha:9/8/2010 5:02:50 PM HV:20.0kV D. imp.:8.87kcps

El AN Series unn. C norm. C Atom. C Compound Comp. C norm. Comp. C Error
 [wt.%] [wt.%] [at.%] [wt.%] [wt.%] [wt.%]

Fe 26 K-series	17.67	22.84	10.67	22.84	17.67	0.5
Na 11 K-series	16.65	21.52	24.44	21.52	16.65	1.1
O 8 K-series	15.77	20.38	33.25	0.00	0.00	0.7
Si 14 K-series	13.84	17.89	16.62	SiO2 38.27	29.61	0.6
Ca 20 K-series	6.81	8.80	5.73	8.80	6.81	0.2
Al 13 K-series	1.84	2.38	2.31	2.38	1.84	0.1
C 6 K-series	1.54	1.98	4.31	1.98	1.54	0.5
K 19 K-series	1.16	1.50	1.00	1.50	1.16	0.1
S 16 K-series	1.07	1.39	1.13	1.39	1.07	0.1
Cu 29 K-series	1.02	1.32	0.54	1.32	1.02	0.1

Total: 77.37 100.00 100.00

Figura A2646.Caracterización química de fase escoria, ensayo 25.



Muestra PM3 1 Fecha:9/8/2010 5:06:50 PM HV:20.0kV D. imp.:8.39kcps

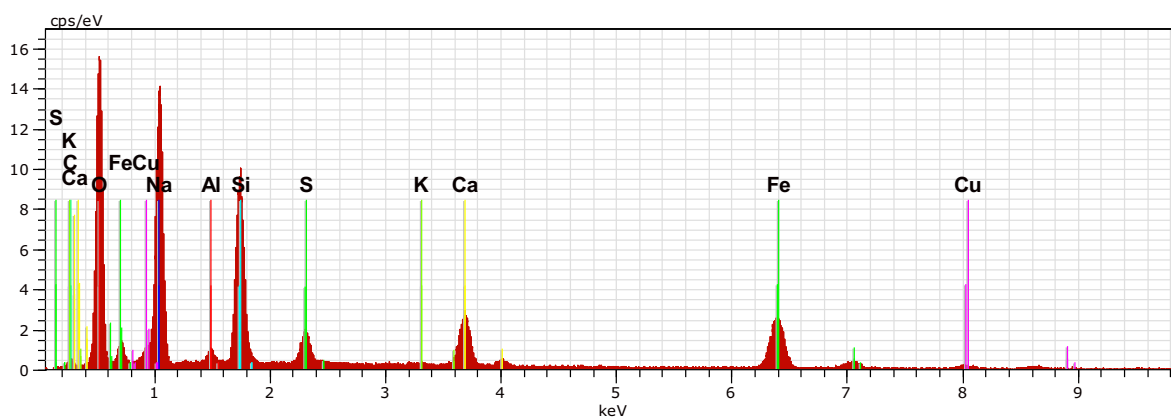
El AN Series unn. C norm. C Atom. C Compound Comp. C norm. Comp. C Error

[wt.%) [wt.%) [at.%) [wt.%) [wt.%) [wt.%)

		[wt.%)	[wt.%)	[at.%)	[wt.%)	[wt.%)	[wt.%)
O 8 K-series	16.30	20.80	32.73	0.00	0.00	0.7	
Fe 26 K-series	15.99	20.40	9.20	20.40	15.99	0.5	
Si 14 K-series	14.31	18.26	16.37	SiO2	39.06	30.61	0.6
Na 11 K-series	12.91	16.47	18.04	16.47	12.91	0.9	
Ca 20 K-series	7.36	9.39	5.90	9.39	7.36	0.2	
C 6 K-series	4.63	5.91	12.39	5.91	4.63	1.1	
Cu 29 K-series	2.96	3.78	1.50	3.78	2.96	0.1	
S 16 K-series	1.78	2.27	1.78	2.27	1.78	0.1	
K 19 K-series	1.19	1.52	0.98	1.52	1.19	0.1	
Al 13 K-series	0.94	1.20	1.12	1.20	0.94	0.1	

Total: 78.38 100.00 100.00

Figura A27.Caracterización química de fase escoria, ensayo 26.



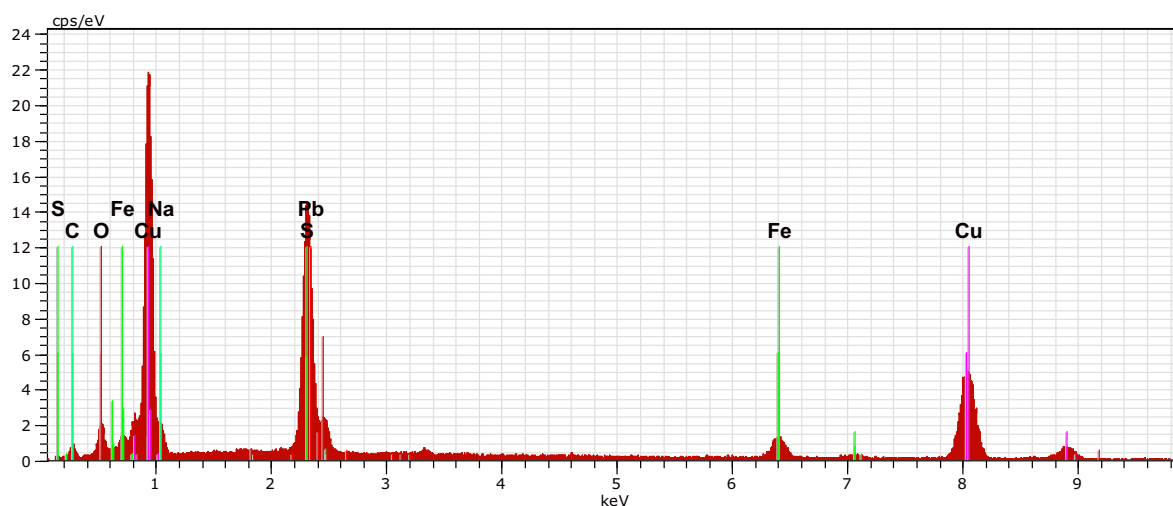
Muestra PM4 1 Fecha:9/8/2010 5:10:55 PM HV:20.0kV D. imp.:6.57kcps

El AN Series unn. C norm. C Atom. C Compound Comp. C norm. Comp. C Error
 [wt.%] [wt.%] [at.%] [wt.%] [wt.%] [wt.%]

Na 11 K-series	24.49	31.49	35.38		31.49	24.49	1.6
Fe 26 K-series	16.58	21.32	9.86		21.32	16.58	0.5
O 8 K-series	12.03	15.46	24.97		0.00	0.00	0.5
Si 14 K-series	10.55	13.57	12.48	SiO2	29.04	22.58	0.5
Ca 20 K-series	6.03	7.76	5.00		7.76	6.03	0.2
C 6 K-series	2.72	3.50	7.53		3.50	2.72	0.8
S 16 K-series	2.35	3.03	2.44		3.03	2.35	0.1
Cu 29 K-series	1.85	2.37	0.96		2.37	1.85	0.1
Al 13 K-series	1.00	1.29	1.23		1.29	1.00	0.1
K 19 K-series	0.16	0.21	0.14		0.21	0.16	0.0

Total: 77.77 100.00 100.00

Figura A28. Caracterización química de fase escoria, ensayo 27.



Muestra PE1 1 Fecha:9/8/2010 5:24:56 PM HV:20.0kV D. imp.:8.63kcps

El AN Series un. C norm. C Atom. C Error

[wt.%) [wt.%) [at.%) [wt.%)

Cu 29 K-series 54.04 53.67 31.71 1.5

S 16 K-series 16.31 16.20 18.97 0.6

C 6 K-series 7.36 7.31 22.86 1.5

Pb 82 M-series 7.15 7.10 1.29 0.3

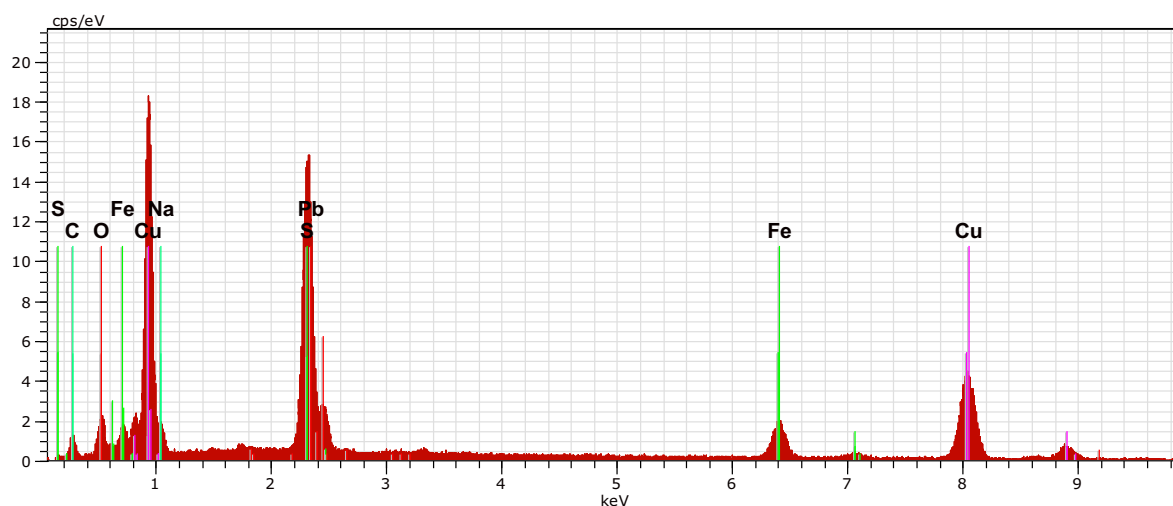
O 8 K-series 6.67 6.63 15.55 1.1

Fe 26 K-series 5.47 5.44 3.66 0.2

Na 11 K-series 3.68 3.66 5.97 0.3

Total: 100.68 100.00 100.00

Figura A29.Caracterización química de fase mata, ensayo 28.



Muestra PE2 1 Fecha:9/8/2010 5:30:26 PM HV:20.0kV D. imp.:8.49kcps

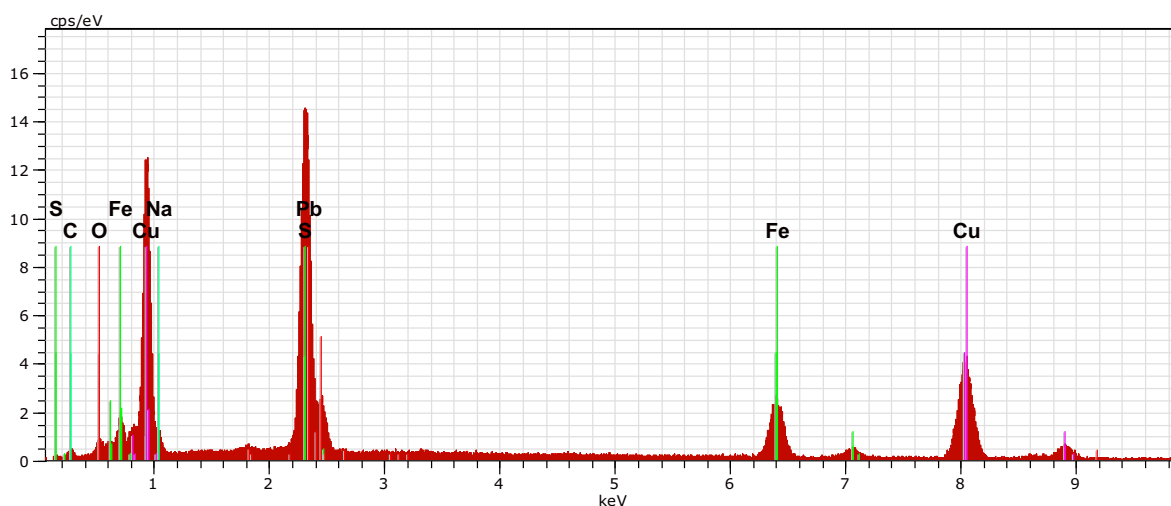
El AN Series unn. C norm. C Atom. C Error

[wt.%) [wt.%) [at.%) [wt.%)

	[wt.%)	[wt.%)	[at.%)	[wt.%)
Cu 29 K-series	46.64	46.51	26.29	1.3
S 16 K-series	16.15	16.10	18.04	0.6
Pb 82 M-series	9.26	9.23	1.60	0.4
C 6 K-series	9.18	9.16	27.38	1.7
Fe 26 K-series	8.61	8.58	5.52	0.3
O 8 K-series	7.18	7.16	16.08	1.2
Na 11 K-series	3.27	3.26	5.10	0.3

Total: 100.29 100.00 100.00

Figura A30.Caracterización química de fase mata, ensayo 29.



Muestra PE3 1 Fecha:9/8/2010 5:35:12 PM HV:20.0kV D. imp.:7.32kcps

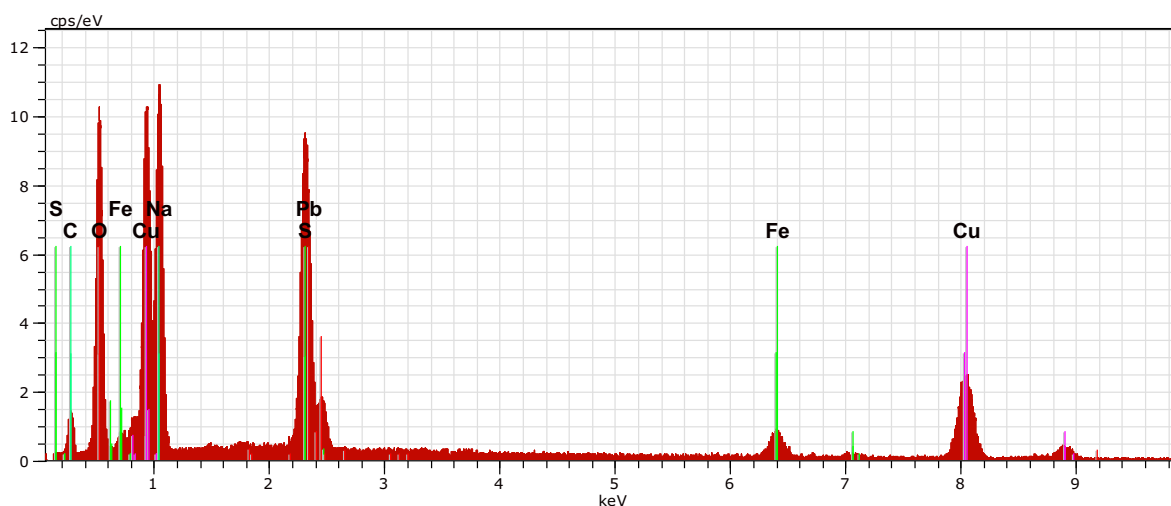
El AN Series un. C norm. C Atom. C Error

[wt.%) [wt.%) [at.%) [wt.%)

Cu 29 K-series	50.14	48.68	33.78	1.4
S 16 K-series	19.10	18.55	25.50	0.7
Fe 26 K-series	13.87	13.47	10.63	0.4
Pb 82 M-series	10.30	10.00	2.13	0.4
C 6 K-series	4.55	4.41	16.20	1.0
O 8 K-series	2.93	2.84	7.83	0.6
Na 11 K-series	2.11	2.05	3.93	0.2

Total: 103.00 100.00 100.00

Figura A3147.Caracterización química de fase mata, ensayo 30.



Muestra PE4 1 Fecha:9/8/2010 5:39:39 PM HV:20.0kV D. imp.:6.86kcps

El AN Series un. C norm. C Atom. C Error

[wt.%) [wt.%) [at.%) [wt.%)

O 8 K-series	31.53	27.44	41.72	4.0
Cu 29 K-series	30.34	26.41	10.11	0.9
Na 11 K-series	22.32	19.42	20.55	1.5
C 6 K-series	10.62	9.24	18.71	1.8
S 16 K-series	10.26	8.93	6.78	0.4
Pb 82 M-series	5.78	5.03	0.59	0.2
Fe 26 K-series	4.06	3.54	1.54	0.2

Total: 114.90 100.00 100.00

Figura A32.Caracterización química de fase mata, ensayo 31.

ANEXO IV

Determinación de la composición de SiO_2 , Na_2O Y B_2O_3 para ubicar en un diagrama ternario

De los resultados obtenidos mediante el análisis de difracción de rayos X, de los concentrados polisulfurados que se presenta en la Tabla A3, se calculo la cantidad de silicio presente en el mineral, por ejemplo para el concentrado de Pacto.

Tabla A382. Análisis de difracción de rayos X para calcular % de Si

Mineral	Formula	Contenido (%)
Cuarzo	SiO_2	79
Caolinita	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	7
Pirita	FeS_2	6
Calcopirita	CuFeS_2	1
Muscorita	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	2
Calcita	CaCO_3	2
Galena	PbS	2
Esfalerita	ZnS	1

La cantidad de sílice que se encuentra en la muestra es de 79 % del total, el mineral tiene una porción de 30g, entonces la cantidad de sílice es de

$$0.79 * 30 = 23,7g \text{ de } \text{SiO}_2 \quad [\text{A5}]$$

Como no hay otra cantidad representativa de sílice y tampoco hay sílice en la carga fundente solamente se trabajara con la cantidad antes mencionada.

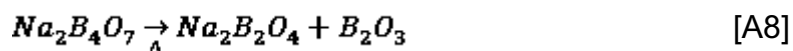
La cantidad de oxido de sodio y de anhídrido bórico se obtienen estequiométricamente.



Para el caso del mineral en estudio se colocó 40 g de Na_2CO_3

$$40\text{gNa}_2\text{CO}_3 * \frac{1\text{molNa}_2\text{CO}_3}{134\text{gNa}_2\text{CO}_3} * \frac{1\text{molNa}_2\text{O}}{1\text{molNa}_2\text{CO}_3} * \frac{62\text{gNa}_2\text{O}}{1\text{molNa}_2\text{CO}_3} = 18,5\text{gNa}_2\text{O} \quad [\text{A7}]$$

De igual forma para la cantidad de anhídrido bórico



$$30\text{gNa}_2\text{B}_4\text{O}_7 * \frac{1\text{molNa}_2\text{B}_4\text{O}_7}{202\text{gNa}_2\text{B}_4\text{O}_7} * \frac{1\text{molB}_2\text{O}_3}{1\text{molNa}_2\text{B}_4\text{O}_7} * \frac{70\text{gB}_2\text{O}_3}{1\text{molB}_2\text{O}_3} = 10,4\text{gNa}_2\text{O} \quad [\text{A9}]$$

En la tabla A4, se presenta las cantidades de los óxidos presentes en el diagrama ternario.

Tabla A4. Cantidades de SiO_2 , Na_2O y B_2O_3 para el diagrama ternario

Compuesto	Cantidad (g)
SiO_2	23,7
Na_2O	18,5
B_2O_3	10,4

La cantidad de óxidos totales es de 52,6 g

$$\% \text{SiO}_2 = \frac{23,7}{52,6} * 100\% = 45\%$$

$$\% \text{Na}_2\text{O} = \frac{18,5}{52,6} * 100\% = 35,2\%$$

$$\% \text{B}_2\text{O}_3 = \frac{10,4}{52,6} = 19,8\%$$

Estas son las proporciones que se representan en el diagrama ternario Na_2O - B_2O_3 - SiO_2 .