



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

**Biolixiviación como pretratamiento a minerales auríferos
refractarios**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

AUTOR

Nilton Paul ORTIZ BARRAZA

ASESOR

Mg. Vladimir Alejandro ARIAS ARCE

Lima, Perú

2021



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Ortiz, N. (2021). *Biolixiviación como Pretratamiento a Minerales Auríferos Refractarios*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Hoja de metadatos complementarios

Código ORCID del autor	“—”
DNI o pasaporte del autor	47962150
Nombre del asesor	Vladimir Alejandro Arias Arce
Código ORCID del asesor	https://orcid.org/0000-0002-7053-9656
DNI o pasaporte del asesor	07009405
Grupo de investigación	Tecnologías Limpias para la convivencia medio- ambiental.
Agencia financiadora	Ninguna
Ubicación geográfica donde se desarrolló la investigación	País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Cercado de Lima Latitud: -12.060225 Longitud: -77.084022
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2017- 2020
Disciplinas OCDE	Biotechnología industrial https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.09.01 Minería, Procesamiento de minerales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05 Biotechnología ambiental https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.08.01



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú - Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

«Año del Bicentenario del Perú: 200 años de Independencia»

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO METALÚRGICO

Mediante la plataforma virtual de Google Meet la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el jueves 03, del mes de junio del 2021 siendo las 20:05 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Reunidos virtualmente para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS de Don: NILTON PAUL ORTIZ BARRAZA Bachiller en Ingeniería Metalúrgica, quien sustentó la Tesis Titulada: «BIOLIXIVIACIÓN COMO PRETRATAMIENTO A MINERALES AURÍFEROS REFRACTARIOS» para la obtención del Título Profesional de Ingeniero: METALÚRGICO.

Los miembros del Jurado Calificador, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

.....SATISFACCIÓN.....

El Jurado procedió a la calificación según el reglamento vigente, cuyo resultado fue la nota de:

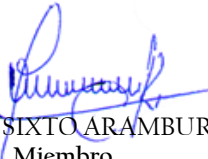
.....QUINCE (15).....

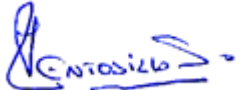
Habiendo concluido la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Miembro Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO, a Don: Nilton Paul Ortiz Barraza.

Siendo las 21:00 horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis.

Lima, 03 de junio de 2021


ING. MANUEL PRUDENCIO CABALLERO RIOS
Miembro Presidente


DR. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
Miembro


ING. JORGE LUIS VENTOSILLA SHAW
Miembro



UNMSM

Firmado digitalmente por ORIHUELA
SALAZAR Luis Alfredo FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 04.06.2021 14:19:27 -05:00

Mg. LUIS ALFREDO ORIHUELA SALAZAR
DIRECTOR
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

Datos de la plataforma virtual institucional del acto de sustentación:

https: <https://meet.google.com/fmz-fspw-xgq>

Grabación archivada en: <https://drive.google.com/file/d/142eJKrwMIlb51asOPN2nYk9SthlaCziR>

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por otorgarnos el privilegio de vivir,

A mi asesor Vladimir Arias Arce y mi profesora Pilar Avilés Mera, por su apoyo y contribución,
desinteresados.

A mi familia que es mi motivo, refugio y orgullo.

Al Vicerrectorado de Investigación y Posgrado (VRIP) de la UNMSM por el financiamiento
otorgado para el desarrollo y culminación de esta tesis.

Índice

Lista de Tablas	ix
Lista de Figuras	xiii
Nomenclatura	xix
Resumen	2
Abstract	4
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.1 Identificación del Problema	6
1.2 Formulación del Problema	7
1.2.1. Problema general.	7
1.2.2. Problemas específicos.	7
1.3 Objetivos de la Investigación	7
1.3.1. Objetivo general.	7
1.3.2. Objetivos específicos.	7
1.4 Justificación	8
1.4.1. Teórica.	8
1.4.2. Tecnológica.	8
1.4.3. Económica.	8
1.4.4. Medioambiental.	8
1.4.5. Importancia.	9
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	10
2.1 Antecedentes del Estudio	10
2.2 Biotecnología Aplicada a la Minería.....	13
2.2.1. Conceptos en la Biolixiviación.	14
2.2.1.1. Acidithiobacillus ferrooxidans y Otros Microorganismos.	15
2.2.2. Mecanismos de la Lixiviación Bacteriana.	17
2.2.3. Tecnologías basadas en biolixiviación.	19
2.2.3.1. Biolixiviación en Pilas.	19
2.2.3.2. Biolixiviación en Botaderos.	21
2.2.3.3. Biolixiviación In Situ.	21
2.2.3.4. Biolixiviación en Tanques Agitados.	22

2.2.4. Biolixiviación en el Perú- Proyecto de Tamboraque.	22
2.2.4.1. Descripción del Proceso.	23
2.2.5. Extracción de Cobre.	23
2.2.6. Pretratamiento de Oro Refractario.	24
2.2.7. Ventajas y Desventajas de su Aplicación.	26
2.2.8. Factores que Afectan la Biolixiviación.	27
2.3 Diagrama de Estabilidad Eh- pH	31
2.4 Sulfuros Capaces de Ser Biolixiviados	33
2.4.1. Biolixiviación de Piritita, Pirrotita y Marcasita.....	34
2.4.2. Biolixiviación de Arsenopiritita.....	35
2.4.3. Biolixiviación de Sulfuros de Cobre.	36
2.4.4. Biolixiviación de Sulfuros de Zinc.	38
2.4.5. Biolixiviación de Sulfuros de Plomo, Antimonio y Molibdeno.	38
2.4.6. Biolixiviación de Minerales de Uranio.....	39
2.5 Efecto de la Aireación en la Biolixiviación	39
2.6 Importancia del pH en la Biolixiviación.....	40
2.7 La Importancia del Potencial Óxido Reducción en la Biolixiviación	41
2.8 Importancia de la Población Bacteriana en la Biolixiviación.....	42
2.9 El Proceso de Cianuración en el Oro	42
2.9.1. Cianuración.	43
2.9.2. Factores que Influyen en la Disolución de Oro.....	44
2.9.2.1. Efecto de las Gangas.....	47
2.9.2.2. Efecto de Iones Cianicidas.....	48
Glosario de Términos	49
CAPÍTULO III METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	54
3.1 Hipótesis y Variables	54
3.1.1. Hipótesis.	54
3.1.2. Variables de la Investigación.....	54
3.1.2.1. En el Pretratamiento de Biolixiviación.....	54
3.1.2.2. En el Postratamiento de Cianuración.	55
3.1.3. Operacionalización de las Variables.	55

3.2 Caracterización de la Muestra	56
3.2.1. Análisis Mineralógico.	56
3.2.2. Grados de Liberación y Distribución Volumétrica.	56
3.2.3. Representación Gráfica del Porcentaje de Distribución Volumétrica.	57
3.3 Análisis Granulométrico	58
3.4 Análisis Químico	59
3.5 Diagrama de Flujo del Proceso	60
3.6 Plan de Ensayos	60
3.6.1. Pruebas de Biolixiviación como Pretratamiento.	60
3.6.1.1. Parámetros en el Pretratamiento.	61
3.6.1.2. Diseño Experimental para las Pruebas de Biolixiviación.	62
3.6.2. Pruebas de Cianuración como Postratamiento.	63
3.6.2.1. Parámetros en el Postratamiento.	64
3.6.2.2. Diseño Experimental para las Pruebas de Cianuración.	65
CAPÍTULO IV ENSAYOS EXPERIMENTALES	66
4.1 Biolixiviación como Pretratamiento a la Cianuración	66
4.1.1. Estudio de la Muestra a Tratar con Granulometría 88.09% -100 mallas.	66
4.1.1.1. Recuperación de los Metales de Interés en 88.09% -100 mallas.	68
4.1.1.2. Control del Crecimiento de la Población Bacteriana en los Días Durante las Etapas de Biolixiviación en 88.09% -100 mallas.	75
4.1.1.3. Respuesta del Potencial Óxido Reducción en los Días Durante las Etapas de Biolixiviación en 88.09% -100 mallas.	79
4.1.1.4. Respuesta del Oxígeno Disuelto en los Días Durante las Etapas de Biolixiviación en 88.09% -100 mallas.	81
4.1.2. Estudio de la Muestra a Tratar con Granulometría 65.23% -200 mallas.	84
4.1.2.1. Recuperación de los Metales de Interés en 65.23% -200 mallas.	84
4.1.2.2. Control del Crecimiento de la Población Bacteriana en los Días Durante las Etapas de Biolixiviación en 65.23% -200 mallas.	91
4.1.2.3. Respuesta del Potencial Óxido Reducción en los Días Durante las Etapas de Biolixiviación en 65.23% -200 mallas.	94

4.1.2.4. Respuesta del Oxígeno Disuelto en los Días Durante las Etapas de Biolixiviación en 65.23% -200 mallas.	97
4.1.3. Estudio de la muestra a Tratar con Granulometría 50.27% -325 mallas. ...	100
4.1.3.1. Recuperación de los Metales de Interés en 50.27% -325 mallas.	100
4.1.3.2. Control del Crecimiento de la Población Bacteriana en los Días Durante las Etapas de Biolixiviación en 50.27% -325 mallas.	107
4.1.3.3. Respuesta del Potencial Óxido Reducción en los Días Durante las Etapas de Biolixiviación en 50.27% -325 mallas.	110
4.1.3.4. Respuesta del Oxígeno Disuelto en los Días Durante las Etapas de Biolixiviación en 50.27% -325 mallas.	113
4.1.4. Diseño experimental en la prueba de Biolixiviación.	117
4.1.4.1. Diseño Experimental Factorial Completo para el Porcentaje de Recuperación de Fierro en Solución en el Acumulado.	117
4.1.4.1.1. Resumen del Diseño Experimental con Respuesta el %Rec. Fe.....	117
4.1.4.1.2. Análisis de Varianza (ANOVA) para el %Rec. como Respuesta.....	120
4.1.4.1.3. Ecuación de regresión en las distintas Mallas para el %Rec. de Fe.....	125
4.1.4.2. Diseño Experimental Factorial Completo para el Porcentaje de Recuperación de Arsénico en Solución en el Acumulado.	127
4.1.4.2.1. Resumen del Diseño Experimental con Respuesta el %Rec. As.....	127
4.1.4.2.2. Análisis de Varianza (ANOVA) para el %Rec. como respuesta.	129
4.2 Recuperación de Oro en la Cianuración a partir del Sólido y del Postratamiento Bacteriano.....	135
4.2.1. Consumo de Reactivos en la Prueba de Cianuración.....	135
4.2.2. Resultados de las Pruebas de Cianuración.	140
4.2.3. Diseño Experimental en la prueba de Cianuración.....	142

4.2.3.1. Diseño Experimental Factorial Simple de 2^2 para el Porcentaje de Recuperación de Oro en Solución al Final de la Prueba de Postratamiento.	142
4.2.3.1.1. Análisis de Varianza (ANOVA) para el %Rec. Au como respuesta.	143
4.2.3.1.2. Ecuación de regresión en las distintas Mallas para el %Rec. de Au.	147
CAPÍTULO V INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.	150
5.1 Contraste de los Resultados con la Hipótesis	150
5.2 Contraste de los Resultados con Otros Estudios	150
5.3 Conclusiones	153
6. Recomendaciones	154
7. Bibliografía	155
8. Anexos	167
8.1 Guía para hacer los Cálculos en la Reposición de Cianuro en las Pruebas de Lixiviación.	167
8.1.1. Nitrato de Plata.	167
8.1.2. Determinación de la Pureza de Cianuro.	167
8.1.3. Reacción Química en la Titulación.	168
8.1.4. Cálculo del Consumo de Cianuro y Cal.	170
8.1.5. Determinación de la Alcalinidad de la Solución Cianurada.	171
8.2 Determinación experimental del tiempo de duración y etapas del pretratamiento	172
8.2.1. Curvas de Potencial Óxido Reducción en Función al Tiempo.	173
8.2.2. Curvas de la Población Bacteriana en Función al Tiempo.	173
8.2.3. Curvas del Porcentaje de Recuperación del Ion Fierro en Función al Tiempo.	174
8.3 Conteo Celular	174
8.4 Medio de Cultivo Bacteriano.	177
8.4.1. Tipos de Medio de Cultivo.	179
8.4.1.1. ¿Por qué existen diferentes formatos de medios de cultivo?	180

Lista de Tablas

Tabla 1 Operaciones de biolixiviación de cobre en el mundo a través de los años (Watling, 2006)	12
Tabla 2 Características de las bacterias mesófilas con capacidad lixivante (Rodríguez et al., 2001)	16
Tabla 3 Características de las bacterias termófilas con capacidad lixivante (Rodríguez et al., 2001)	17
Tabla 4 Parámetros del Proceso en Tamboraque (Ly Arrascue, 2006)	23
Tabla 5 Ventajas y desventajas de la lixiviación bacteriana. (Vallejo Gavira, 2015; Rodríguez et al., 2001)	26
Tabla 6 Sulfuros principales capaces de ser oxidados en presencia de bacterias (Codelco, 2018)	34
Tabla 7 Variables dependientes e independientes expresadas como función: $y = f(x)$, en el pretratamiento de biolixiviación	55
Tabla 8 Variables dependientes e independientes expresadas como función: $y = f(x)$, en el postratamiento de cianuración	55
Tabla 9 Caracterización mineralógica	56
Tabla 10 Grados de liberación y porcentaje de distribución volumétrica	56
Tabla 11 Tabla de resultados del análisis granulométrico	59
Tabla 12 Tabla de resultados del análisis químico por mallas	59
Tabla 13 Plan de ensayos de las pruebas de pretratamiento	62
Tabla 14 Plan de ensayos de las pruebas de cianuración posbiolixiviación	65
Tabla 15 Porcentaje de recuperación de los metales de interés (hierro y arsénico) en solución al término de cada etapa durante las pruebas de biolixiviación	67
Tabla 16 Tabla de datos del %R Cu en solución de la 88.09% -100 mallas por etapa	68
Tabla 17 Tabla de datos del %R Zn en solución de la 88.09% -100 mallas por etapa	70
Tabla 18 Tabla de datos del %R Fe en solución de la 88.09% -100 mallas por etapa	71
Tabla 19 Tabla de datos del %R As en solución de la 88.09% -100 mallas por etapa	73
Tabla 20 Conteo de la población bacteriana en células/mL de la primera etapa en 88.09% -100 mallas	76

Tabla 21 Conteo de la población bacteriana en células/mL de la segunda etapa en 88.09% -100 mallas	76
Tabla 22 Conteo de la población bacteriana en células/mL de la tercera etapa en 88.09% -100 mallas	77
Tabla 23 Medición del Potencial Óxido Reducción en mV de la primera etapa en 88.09% -100 mallas	79
Tabla 24 Medición del Potencial Óxido Reducción en mV de la segunda etapa en 88.09% -100 mallas	79
Tabla 25 Medición del Potencial Óxido Reducción en mV de la tercera etapa en 88.09% -100 mallas	80
Tabla 26 Oxígeno disuelto en ppm en el tiempo durante la primera etapa	81
Tabla 27 Respuesta del oxígeno disuelto en ppm en el tiempo durante la segunda etapa	82
Tabla 28 Respuesta del oxígeno disuelto en ppm en el tiempo durante la tercera etapa	82
Tabla 29 Tabla de datos del %R Cu en solución de la 65.23% -200 mallas por etapa.....	84
Tabla 30 Tabla de datos del %R Zn en solución de la 65.23% -200 mallas por etapa.....	86
Tabla 31 Tabla de datos del %R Fe en solución de la 65.23% -200 mallas por etapa	87
Tabla 32 Tabla de datos del %R As en solución de la 65.23% -200 mallas por etapa.....	89
Tabla 33 Conteo de la población bacteriana en células/mL de la primera etapa en 65.23% -200 mallas	91
Tabla 34 Conteo de la población bacteriana en células/mL de la segunda etapa en 65.23% -200 mallas	92
Tabla 35 Conteo de la población bacteriana en células/mL de la tercera etapa en 65.23% -200 mallas	92
Tabla 36 Medición del Potencial Óxido Reducción en mV de la primera etapa en 65.23% -200 mallas	94
Tabla 37 Medición del Potencial Óxido Reducción en mV de la segunda etapa en 65.23% -200 mallas	95
Tabla 38 Medición del Potencial Óxido Reducción en mV de la tercera etapa en 65.23% -200 mallas	95
Tabla 39 Respuesta del oxígeno disuelto en ppm en el tiempo durante la primera etapa.....	97
Tabla 40 Respuesta del oxígeno disuelto en ppm en el tiempo durante la segunda etapa	98

Tabla 41 Respuesta del oxígeno disuelto en ppm en el tiempo durante la tercera etapa	98
Tabla 42 Tabla de datos del %R Cu en solución de la 50.27% -325 mallas por etapa.....	100
Tabla 43 Tabla de datos del %R Zn en solución de la 50.27% -325 mallas por etapa	102
Tabla 44 Tabla de datos del %R Fe en solución de la 50.27% -325 mallas por etapa	103
Tabla 45 Tabla de datos del %R As en solución de la 50.27% -325 mallas por etapa.....	105
Tabla 46 Conteo de la población bacteriana en células/mL de la primera etapa	107
Tabla 47 Conteo de la población bacteriana en células/mL de la segunda etapa.....	108
Tabla 48 Conteo de la población bacteriana en células/mL de la tercera etapa.....	108
Tabla 49 Medición del Potencial Óxido Reducción en mV de la primera etapa	110
Tabla 50 Medición del Potencial Óxido Reducción en mV de la segunda etapa.....	111
Tabla 51 Medición del Potencial Óxido Reducción en mV de la tercera etapa.....	111
Tabla 52 Respuesta del oxígeno disuelto en ppm en el tiempo durante la primera etapa.....	113
Tabla 53 Respuesta del oxígeno disuelto en ppm en el tiempo durante la segunda	114
Tabla 54 Respuesta del oxígeno disuelto en ppm en el tiempo durante la tercera.....	114
Tabla 55 Resumen del Diseño para el DOE con %Rec. Fe en el acumulado	118
Tabla 56 Información del Factor	118
Tabla 57 Estructura de los ensayos para la recuperación de Fe acumulado en solución	119
Tabla 58 ANOVA para el %Rec. de Fe	120
Tabla 59 Resumen del modelo	120
Tabla 60 Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes	121
Tabla 61 Resumen del diseño para el DOE con %Rec. As en el acumulado	127
Tabla 62 Información del Factor	127
Tabla 63 Estructura de los ensayos para la recuperación de As acumulado en solución.....	128
Tabla 64 ANOVA para el %Rec. de As.....	129
Tabla 65 Resumen del modelo	129
Tabla 66 Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes	130
Tabla 67 Consumo de los reactivos usados en la prueba de cianuración de la muestra nro. 1 ...	136
Tabla 68 Consumo de los reactivos usados en la prueba de cianuración de la muestra nro. 2 ...	136
Tabla 69 Consumo de los reactivos usados en la prueba de cianuración de la muestra nro. 3 ...	137
Tabla 70 Consumo de los reactivos usados en la prueba de cianuración de la muestra nro. 4 ...	137
Tabla 71 Consumo de los reactivos usados en la prueba de cianuración de la muestra nro. 5 ...	138

Tabla 72 Consumo de los reactivos usados en la prueba de cianuración de la muestra nro. 6 ...	138
Tabla 73 Resumen del consumo de cal y cianuro en las pruebas de cianuración tomando como media los resultados de la réplica	139
Tabla 74 Resultados de las pruebas de cianuración de las muestras pretratadas (1, 2, 3 y 4) y las sin pretratamiento (5 y 6)	141
Tabla 75 Resultados en el porcentaje de recuperación de oro por duplicado	142
Tabla 76 Resumen del Diseño para el DOE con %Rec. de Au en solución como respuesta	142
Tabla 77 Información del Factor	142
Tabla 78 Estructura de los ensayos para la recuperación de Au al final de la prueba de cianuración.....	143
Tabla 79 ANOVA considerando como variable el producto de las dos variables para el %Rec. de Au.....	144
Tabla 80 ANOVA sin considerar el producto de las dos variables para el %Rec. de Au.....	145
Tabla 81 Resumen del Modelo	146
Tabla 82 Concentración del nitrato de plata y el rango de detección respectivo de cianuro (Azañero Ortiz, 2013)	167
Tabla 83 Resumen del cianuro de sodio repuesto por cada periodo hasta el término de la lixiviación (Azañero Ortiz, 2013)	171
Tabla 84 Composición del 9K líquido	178

Lista de Figuras

<i>Figura N° 1.</i> Esquema visualizando los distintos mecanismos de lixiviación de un sulfuro.	19
<i>Figura N° 2.</i> Diagrama Eh- pH de estabilidad del hierro en solución, involucrado con los principales grupos de bacterias oxidantes del Fe. • Mina de Fornas, * Mina de Toro.	31
<i>Figura N° 3.</i> Diagrama Eh- pH de Pirita, -S rómbico, Fe_2O_3 amorfo, jarosita y $K^+ . SO_4^{2-}$, Fe^{2+} y Fe^{3+} disueltos a un $\log [SO_4^{2-}] = -2.3$, $\log [K^+] = -3.3$ a $25^\circ C$ y 1 atm.	32
<i>Figura N° 4.</i> Concentración de hierro y sulfatos de mineral aurífero refractario de la biooxidación en el sistema batch.	35
<i>Figura N° 5.</i> Esquema de un proceso de biolixiviación para la extracción de cobre de un concentrado de la flotación incluyendo la molienda de dicho concentrado.	37
<i>Figura N° 6.</i> Respuesta a la inyección mecánica del aire en la lixiviación del arsénico.	40
<i>Figura N° 7.</i> Diagrama Eh- pH y la acción del CN^- para un sistema de $Au - CN - H_2O$ a $25^\circ C$	47
<i>Figura N° 8.</i> Gráfica del porcentaje de distribución volumétrica de la muestra.	57
<i>Figura N° 9.</i> Vistas de microscopía óptica de minerales opacos en la muestra de cabeza.	58
<i>Figura N° 10.</i> Porcentaje de la recuperación de cobre sin aireación en solución por etapa de cada muestra en la 88.09% -100 mallas.	69
<i>Figura N° 11.</i> Porcentaje de la recuperación de cobre con aireación en solución por etapa de cada muestra en la 88.09% -100 mallas.	69
<i>Figura N° 12.</i> Porcentaje de la recuperación de zinc sin aireación en solución por etapa de cada muestra en la 88.09% -100 mallas.	70
<i>Figura N° 13.</i> Porcentaje de la recuperación de zinc con aireación en solución por etapa de cada muestra en la 88.09% -100 mallas.	71
<i>Figura N° 14.</i> Porcentaje de la recuperación de fierro sin aireación en solución por etapa de cada muestra en la 88.09% -100 mallas.	72
<i>Figura N° 15.</i> Porcentaje de la recuperación de fierro con aireación en solución por etapa de cada muestra en la 88.09% -100 mallas.	72
<i>Figura N° 16.</i> Porcentaje de la recuperación de arsénico sin aireación en solución por etapa de cada muestra en la 88.09% -100 mallas.	73
<i>Figura N° 17.</i> Porcentaje de la recuperación de arsénico con aireación en solución por etapa de cada muestra en la 88.09% -100 mallas.	74

<i>Figura N° 18.</i> Representación gráfica del resumen de la recuperación de los metales de interés (Cu, Zn, Fe y As) en solución al término de las pruebas de biolixiviación en 88.09% -100 mallas.	74
<i>Figura N° 19.</i> Concentración de los metales de interés en solución al término de la primera etapa en 88.09% -100 mallas.	75
<i>Figura N° 20.</i> Comportamiento del crecimiento bacteriano en las muestras sin aireación en 88.09% -100 mallas, durante el tiempo en las tres etapas de la prueba de biolixiviación.	77
<i>Figura N° 21.</i> Comportamiento del crecimiento bacteriano en las muestras con aireación en 88.09% -100 mallas, durante el tiempo en las tres etapas de la prueba de biolixiviación.	78
<i>Figura N° 22.</i> Fotografía de <i>Thiobacillus ferrooxidans</i> (dentro de los círculos rojos) vista a 1,000 aumentos en la cámara de Neubauer en el microscopio óptico al finalizar la tercera y última etapa de biolixiviación en 88.09% -100 mallas.	78
<i>Figura N° 23.</i> Respuesta del Óxido Potencial Reducción de las muestras sin aireación en 88.09% -100 mallas, durante el tiempo en las tres etapas de la prueba de biolixiviación.	80
<i>Figura N° 24.</i> Respuesta del Óxido Potencial Reducción de las muestras con aireación en 88.09% -100 mallas, durante el tiempo en las tres etapas de la prueba de biolixiviación.	81
<i>Figura N° 25.</i> Oxígeno en solución de todas las muestras en las tres etapas.	83
<i>Figura N° 26.</i> Oxígeno en solución de todas las muestras en las tres etapas.	83
<i>Figura N° 27.</i> Recuperación de cobre sin aireación en solución por etapa de cada muestra en la 65.23% -200 mallas.	85
<i>Figura N° 28.</i> Recuperación de cobre con aireación en solución por etapa de cada muestra en la 65.23% -200 mallas.	85
<i>Figura N° 29.</i> Recuperación de zinc sin aireación en solución por etapa de cada muestra en la 65.23% -200 mallas.	86
<i>Figura N° 30.</i> Recuperación de zinc con aireación en solución por etapa de cada muestra en la 65.23% -200 mallas.	87
<i>Figura N° 31.</i> Recuperación de fierro sin aireación en solución por etapa de cada muestra en la 65.23% -200 mallas.	88
<i>Figura N° 32.</i> Recuperación de fierro con aireación en solución por etapa de cada muestra en la 65.23% -200 mallas.	88

<i>Figura N° 33.</i> Recuperación de arsénico sin aireación en solución por etapa de cada muestra en la 65.23% -200 mallas.	89
<i>Figura N° 34.</i> Recuperación de arsénico con aireación en solución por etapa de cada muestra en la 65.23% -200 mallas.	90
<i>Figura N° 35.</i> Representación gráfica del resumen de la recuperación de los metales de interés (Cu, Zn, Fe y As) en solución al término de las pruebas de biolixiviación en 65.23% -200 mallas.	90
<i>Figura N° 36.</i> Shaker con las muestras en la tercera etapa del pretratamiento en 65.23% -200 mallas.	91
<i>Figura N° 37.</i> Comportamiento del crecimiento bacteriano en las muestras sin aireación en 65.23% -200 mallas, durante el tiempo en las tres etapas de la prueba de biolixiviación.	93
<i>Figura N° 38.</i> Comportamiento del crecimiento bacteriano en las muestras con aireación en 65.23% -200 mallas, durante el tiempo en las tres etapas de la prueba de biolixiviación.	93
<i>Figura N° 39.</i> Fotografía de <i>Thiobacillus ferrooxidans</i> (dentro de los círculos azules) vista a 1,000 aumentos en la cámara de Neubauer en el microscopio óptico al finalizar la tercera y última etapa de biolixiviación en 65.23% -200 mallas.	94
<i>Figura N° 40.</i> Respuesta del Óxido Potencial Reducción de las muestras sin aireación en 65.23% -200 mallas, durante el tiempo en las tres etapas de la prueba de biolixiviación.	96
<i>Figura N° 41.</i> Respuesta del Óxido Potencial Reducción de las muestras con aireación en 65.23% -200 mallas, durante el tiempo en las tres etapas de la prueba de biolixiviación.	96
<i>Figura N° 42.</i> Respuesta del oxígeno en solución de todas las muestras sin aireación en 65.23% -200 mallas durante el tiempo en las tres etapas.	99
<i>Figura N° 43.</i> Respuesta del oxígeno en solución de todas las muestras con aireación en 65.23% -200 mallas durante el tiempo en las tres etapas.	99
<i>Figura N° 44.</i> Recuperación de cobre sin aireación en solución por etapa de cada muestra en la 50.27% -325 mallas.	101
<i>Figura N° 45.</i> Recuperación de cobre con aireación en solución por etapa de cada muestra en la 50.27% -325 mallas.	101
<i>Figura N° 46.</i> Recuperación de zinc sin aireación en solución por etapa de cada muestra en la 50.27% -325 mallas.	102

<i>Figura N° 47.</i> Recuperación de zinc con aireación en solución por etapa de cada muestra en la 50.27% -325 mallas.	103
<i>Figura N° 48.</i> Recuperación de fierro sin aireación en solución por etapa de cada muestra en la 50.27% -325 mallas.	104
<i>Figura N° 49.</i> Recuperación de fierro con aireación en solución por etapa de cada muestra en la 50.27% -325 mallas.	104
<i>Figura N° 50.</i> Recuperación de arsénico sin aireación en solución por etapa de cada muestra en la 50.27% -325 mallas.	105
<i>Figura N° 51.</i> Recuperación de arsénico con aireación en solución por etapa de cada muestra en la 50.27% -325 mallas.	106
<i>Figura N° 52.</i> Representación gráfica del resumen de la recuperación de los metales de interés (Cu, Zn, Fe y As) en solución al término de las pruebas de biolixiviación en 50.27% -325 mallas.	106
<i>Figura N° 53.</i> Cepas bacterianas readaptadas a la muestra.	107
<i>Figura N° 54.</i> Comportamiento del crecimiento bacteriano en las muestras sin aireación en 50.27% -325 mallas, durante el tiempo en las tres etapas de la prueba de biolixiviación.	109
<i>Figura N° 55.</i> Comportamiento del crecimiento bacteriano en las muestras con aireación en 50.27% -325 mallas, durante el tiempo en las tres etapas de la prueba de biolixiviación.	109
<i>Figura N° 56.</i> Fotografía de <i>Thiobacillus ferrooxidans</i> (dentro de los círculos amarillos) vista a 1,000 aumentos en la cámara de Neubauer en el microscopio óptico al finalizar la tercera y última etapa de biolixiviación en 50.27% -325 mallas.	110
<i>Figura N° 57.</i> Respuesta del Óxido Potencial Reducción de las muestras sin aireación en 50.27% -325 mallas, durante el tiempo en las tres etapas de la prueba de biolixiviación.	112
<i>Figura N° 58.</i> Respuesta del Óxido Potencial Reducción de las muestras con aireación en 50.27% -325 mallas, durante el tiempo en las tres etapas de la prueba de biolixiviación.	112
<i>Figura N° 59.</i> Respuesta del oxígeno en solución de todas las muestras sin aireación en 50.27% -325 mallas durante el tiempo en las tres etapas.	115
<i>Figura N° 60.</i> Respuesta del oxígeno en solución de todas las muestras con aireación en 50.27% -325 mallas durante el tiempo en las tres etapas.	115
<i>Figura N° 61.</i> Resultado de las muestras en 50.27% -325 mallas pretratadas para su posterior cianuración.	116

<i>Figura N° 62.</i> Muestra antes y después del tratamiento de biolixiviación en 50.27% -325 mallas.	116
<i>Figura N° 63.</i> Vista de microscopía óptica de minerales opacos en una de las muestras posbiolixiviación.	117
<i>Figura N° 64.</i> Gráfica de Caja para el diagnóstico de valores atípicos en el %Rec. de Fe.....	122
<i>Figura N° 65.</i> Diagrama de Pareto de los efectos principales en función a la respuesta (%Rec. Fe).	123
<i>Figura N° 66.</i> Gráfica de Residuos 4 en 1 en función a la respuesta (%Rec. Fe).....	123
<i>Figura N° 67.</i> Efectos principales y su relación con el %Rec. Media de Fe.	124
<i>Figura N° 68.</i> Interacción de las variables independientes y la Media de %Rec. de Fe.	124
<i>Figura N° 69.</i> Superficie del % Rec. de Fe en función al %Sólidos en la pulpa y la granulometría (Mallas).	126
<i>Figura N° 70.</i> Superficie del %Rec. de Fe en función a las variables independientes desde la vista horizontal.	126
<i>Figura N° 71.</i> Gráfica de Caja para el diagnóstico de valores atípicos en el %Rec. de As.	131
<i>Figura N° 72.</i> Diagrama de Pareto de los efectos principales en función a la respuesta (%Rec. As).....	132
<i>Figura N° 73.</i> Gráfica de Residuos 4 en 1 en función a la respuesta (%Rec. As)	132
<i>Figura N° 74.</i> Efectos principales y su relación con el %Rec. Media de As.....	133
<i>Figura N° 75.</i> Interacción de las variables independientes y la Media de %Rec. de As.....	133
<i>Figura N° 76.</i> Superficie del %Rec. de As en función al %Sólidos en la pulpa y la granulometría (Mallas).	134
<i>Figura N° 77.</i> Superficie del %Rec. de As en función a las variables independientes desde la vista horizontal.	134
<i>Figura N° 78.</i> Shaker con las 6 muestras (4 pretratadas) cianurándose con aireación a 500 y 1000 ppm.....	135
<i>Figura N° 79.</i> Imagen de todas las muestras (6) al término de las pruebas de cianuración listas para filtrar y analizar por oro y plata la solución por Absorción Atómica (AA) y determinar estos mismos metales en el relave mediante vía seca (Fire Assay).....	135
<i>Figura N° 80.</i> Representación gráfica del consumo acumulado de CaO empleado en la prueba de cianuración de todas las muestras (6).....	139

<i>Figura N° 81.</i> Representación gráfica del consumo acumulado de NaCN empleado en la prueba de cianuración de todas las muestras (6).	140
<i>Figura N° 82.</i> Diagrama de barras de las recuperaciones de oro y plata en la cianuración solo en las muestras con pretratamiento.	141
<i>Figura N° 83.</i> Diagrama de Pareto de los efectos principales en función a la respuesta (%Rec. Au).	144
<i>Figura N° 84.</i> Diagrama de Pareto de los efectos principales, sin considerar el efecto del producto de los dos términos, en función a la respuesta (%Rec. Au).	145
<i>Figura N° 85.</i> Gráfica de dispersión del porcentaje de recuperación de oro en función a la fuerza del cianuro agrupado en mallas.	148
<i>Figura N° 86.</i> Gráfica de Residuos 4 en 1 en función a la respuesta (%Rec. Au).	148
<i>Figura N° 87.</i> Efectos principales y su relación con el %Rec. Media de Au.	149
<i>Figura N° 88.</i> Gráfica de cubos elaborada a partir de las variables independientes y tomando como respuesta la media de los datos en la recuperación de oro en solución al final de la prueba de cianuración.	149
<i>Figura N° 89.</i> Curvas del ORP en función al tiempo de interacción entre pulpa y solución bacteriana en muestras al 5% en porcentaje de sólidos a distintos pH constantes.	173
<i>Figura N° 90.</i> Curvas de la población bacteriana en función al tiempo de interacción entre pulpa y solución bacteriana en muestras al 5% en porcentaje de sólidos a distintos pH constantes.	173
<i>Figura N° 91.</i> Curvas del porcentaje de recuperación del ion fierro en función al tiempo de interacción entre pulpa y solución bacteriana en muestras a distintos porcentajes de sólido a un pH igual a 2.	174
<i>Figura N° 92.</i> Secciones a considerar en el conteo celular en la cámara de recuento bacteriano.	175
<i>Figura N° 93.</i> Manejo de la cámara de recuento celular Neubauer improved.	175
<i>Figura N° 94.</i> Cepas bacterianas de <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> reactivadas para ser usadas en el pretratamiento.	181

Nomenclatura

Abreviatura	Significado
%	porcentaje
%(v/v)	porcentaje volumen a volumen
%S(w/w)	porcentaje en sólidos peso a peso
°C	grado Celsius
μ	micra
cel/mL	células por mililitro
cm ³	centímetro cúbico
DO	oxígeno disuelto
g	gramo
g/TM	gramo por tonelada métrica
L/h	litro por hora
mL	mililitro
mm ²	milímetro cuadrado
mV	milivoltio
pH	potencial de hidrógeno
ppm	partes por millón
rpm	revolución por minuto
TM	tonelada métrica
TMSD	tonelada métrica seca por día

Resumen

El presente trabajo describe el estudio de la biolixiviación de un mineral sulfurado y refractario de oro, proveniente de la provincia de Aija del departamento de Áncash, Perú. El estudio comprendió la disolución de los principales metales de la matriz sulfurada refractaria, eligiendo como variables dependientes la disolución del fierro y arsénico. Se desarrolló como primera parte de la investigación el pretratamiento de biolixiviación en agitación y aireación, tomando como variables independientes el porcentaje de sólidos y tamaño de partícula. La segunda o postratamiento, consistió en efectuar la cianuración, con la finalidad de conocer la eficiencia de la biooxidación en la recuperación del oro. Se realizó el estudio de caracterización mineralógica y análisis químico. La muestra al contener fierro, presentó condiciones compatibles para ser tratadas por biolixiviación (el oro se encuentra en partículas libres, asociada a matriz sulfurada y en solución sólida), por lo tanto, fue el punto de partida para el desarrollo del presente trabajo de investigación. Después de haber encontrado las condiciones más favorables en la adaptación bacteriana, y en base al estudio previo de la muestra en el laboratorio, se determinó el tiempo óptimo de 12 días como pretratamiento. En las pruebas preliminares, los valores en la cuantificación de la población bacteriana, el ORP y el porcentaje de disolución del fierro, no sufrían un incremento significativo después del cuarto día en el pretratamiento; en función a ello, se estableció realizar en 3 etapas de 4 días, manteniendo el material sólido y retirando la solución. Mediante el diseño experimental factorial completo, se identificó y cuantificó el grado de relevancia de las variables independientes y su interacción. Dicha interacción se reflejó como respuesta en la solubilidad medida en las recuperaciones de hierro y arsénico. Al término del

pretratamiento de biolixiviación, con 5% en sólidos en la pulpa y a una granulometría de 50.27% -325 mallas, se consigue 44.29% de disolución de fierro y después, mediante cianuración con aireación, se logra una recuperación de 85.48% de oro. La recuperación de oro en la misma muestra sin biooxidación, mediante cianuración sin aireación fue de 20.07% y con aireación fue de 59.81%.

Palabras clave: biolixiviación, biooxidación, solubilidad, oro, cianuración.

Abstract

This research describes the study of the bioleaching of a sulphide and refractory gold mineral, from the province of Aija in the department of Áncash, Peru. The study included the dissolution of the main metals of the refractory sulphided matrix, choosing the dissolution of iron and arsenic as dependent variables. The bioleaching pretreatment in agitation and aeration was developed as the first part of the research, taking as independent variables the percentage of solids and particle size. The second or post-treatment consisted of carrying out cyanidation, in order to know the efficiency of biooxidation in the recovery of gold. The mineralogical characterization study and chemical analysis were carried out. As the sample contains iron, it presented compatible conditions to be treated by bioleaching (gold is found in free particles, associated with a sulphided matrix and in solid solution), therefore, it was the starting point for the development of this research work. After having found the most favorable conditions for bacterial adaptation, and based on the previous study of the sample in the laboratory, the optimal time of 12 days as pretreatment was determined. In the preliminary tests, the values in the quantification of the bacterial population, the ORP and the percentage of dissolution of the iron, did not suffer a significant increase after the fourth day in the pretreatment; Based on this, it was established to be carried out in 3 stages of 4 days, keeping the solid material and removing the solution. Through the full factorial experimental design, the degree of relevance of the independent variables and their interaction was identified and quantified. This interaction was reflected as a response in the solubility measured in the recoveries of iron and arsenic. At the end of the bioleaching pretreatment, with 5% solids in the pulp and a granulometry of 50.27% -325

mesh, 44.29% of iron dissolution is achieved and then, by cyanidation with aeration, a recovery of 85.48% of gold is achieved. The recovery of gold in the same sample without biooxidation, by cyanidation without aeration was 20.07% and with aeration it was 59.81%.

Keywords: bioleaching, biooxidation, solubility, gold, cyanidation.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Identificación del Problema

La recuperación de metales preciosos como el oro y la plata por el proceso tradicional de cianuración, se ve afectada por estar presentes en una matriz sulfurada, encapsulada y refractaria, haciendo menos efectiva o casi imposible el contacto del cianuro con el metal a ser recuperado.

Las especies mineralógicas que contienen los metales a recuperar presentan elementos cianicidas, elementos solubles ante el cianuro como el arsénico, manganeso, antimonio y cadmio, consumiendo cianuro y perjudicando la recuperación del oro y la plata.

Se propone un pretratamiento biológico como es el caso de la biooxidación, que consiste en solubilizar la matriz sulfurada refractaria que encapsula y hace difícil la recuperación de los metales preciosos, para así lograr liberar los metales valiosos para un posterior tratamiento de lixiviación convencional con solución cianurada.

El presente trabajo de investigación se realizó la biooxidación en agitación e insuflando aire al reactor. Es decir, lixiviación con bacterias aeróbicas, a un mineral aurífero sulfurado y refractario, proveniente de la provincia de Aija, Departamento de Ancash.

1.2 Formulación del Problema

1.2.1. Problema general.

¿Cómo influyen la granulometría y el porcentaje de sólidos en el proceso de biooxidación de los minerales sulfurados refractarios, para lograr incremento en la recuperación del oro y la plata mediante la cianuración?

1.2.2. Problemas específicos.

¿Cuál es la granulometría y el porcentaje en sólidos óptimo en un pretratamiento de biolixiviación para liberar las partículas de oro en un mineral sulfurado refractario?

¿Cómo es la interacción de la granulometría y el porcentaje de sólidos en la recuperación de oro por cianuración?

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1. Objetivo general.

Estudiar la biolixiviación como pretratamiento al proceso de cianuración del mineral aurífero refractario de la provincia de Aija del departamento de Áncash, para mejorar la recuperación de oro.

1.3.2. Objetivos específicos.

1. Aplicar la biolixiviación como pretratamiento al proceso de cianuración al mineral aurífero refractario de matriz sulfurada.

2. Realizar pruebas metalúrgicas de cianuración al mineral pretratado para mejorar la recuperación de oro.

1.4 Justificación

1.4.1. Teórica.

El proceso de biolixiviación bacteriana se aplica a los minerales sulfurados refractarios, o como catalizadores para la extracción de metales de interés, ya que permite solubilizar (oxidar) mediante sus mecanismos directos e indirectos como hierro y azufre principalmente. De esta manera con este pretratamiento se busca la disolución de la matriz sulfurada para liberar las partículas de oro, parcialmente o en su totalidad, diseminadas en esta matriz y lograr el contacto entre el radical cianuro y la partícula aurífera como postratamiento.

1.4.2. Tecnológica.

La biotecnología es usada para la recuperación de los metales preciosos y de interés ya que cada vez hay minerales más complejos, haciéndose difícil su procesamiento con los métodos convencionales. Es por eso que la biotecnología haciendo uso de microorganismos es considerada como una opción para la extracción de los metales.

1.4.3. Económica.

La inversión empleada es relativamente baja. Se logra la solubilidad de la matriz sulfurada, permitiendo la liberación de los metales preciosos, que posteriormente son recuperados ventajosamente por cianuración.

1.4.4. Medioambiental.

No se utilizarán reactivos nocivos al medio ambiente. El pretratamiento de biooxidación es un proceso que es bastante sencillo, con reducido consumo energético, recirculación de la solución, mínimo consumo de reactivos químicos y, por ende, el impacto al medio ambiente es reducido. Muy ventajosa en comparación al tratamiento pirometalúrgico.

1.4.5. Importancia.

Mediante la presente investigación se propone reforzar el pretratamiento para minerales complejos, apoyándonos de resultados en función a los diseños experimentales (DOE), como interpretación y análisis de los resultados de las pruebas de laboratorio y la intención de efectuar el escalamiento hasta conseguir la aplicación a escala industrial.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del Estudio

La biolixiviación es un proceso que está siendo utilizado para tratar minerales sulfurados, principalmente para la extracción de metales como el cobre, oro y también el uranio. Se viene demostrando que esta tecnología, en comparación a los procedimientos convencionales, es más económica, eficiente y amigable con el medio ambiente, que los procesos de calentamiento y presurizados. Uno de los principales microorganismos especialmente estudiados en los procesos de lixiviación y oxidación biológica es el *Acidithiobacillus ferrooxidans*. (Makita, 2004)

La lixiviación microbiana de minerales sulfurados se viene dando en la naturaleza durante cientos de años. En base a estudios de antaño, se llegó a la conclusión que el *Acidithiobacillus ferrooxidans* tiene la responsabilidad de la generación y emisión de aguas ácidas y solubilizar elementos metálicos a partir de sulfuros. Por lo tanto, el hallazgo representó una alternativa como solución potencial al problema que se afronta y en un futuro lo harán muchas compañías mineras a nivel mundial, especialmente aquellas que aprecian los agotamientos de sus depósitos de minerales con alta ley, obligando a la inversión en investigación y nuevas metodologías efectivas apuntando hacia la recuperación de elementos metálicos a partir de especies mineralógicas sulfuradas de baja y alta ley, sin descuidar su impacto en el medio ambiente. (Misari, 2016)

“Los sulfuros presentan bondades para su tratamiento por métodos pirometalúrgicos, ya que son fácilmente concentrables debido a que se presentan reacciones exotérmicas durante su procesamiento, suministrando fracción energética para lograr el propósito de la obtención del metal de interés (Rodríguez et al., 2001)”.

La pirometalurgia al ser un proceso altamente contaminante contribuye al problema de la lluvia ácida por las emisiones no controladas de SO_2 . Como respuesta a esta consecuencia y a una política medioambiental existente, necesidad de disminuir los elevados CAPEX y OPEX, surgen los métodos hidrometalúrgicos como alternativas viables. Sin embargo, su principal desventaja es el alto consumo de insumos químicos, elevadas presiones, relacionados a incrementos en las temperaturas de las reacciones usualmente requeridas, sumado a ello los costos en la operación, como en la conminución (molienda). Luego de estudios de investigación, se hacen presente los procesos biotecnológicos, comprendiendo en ello la lixiviación bacteriana con una propuesta viable, sostenible y amigable con el medio ambiente. (Rodríguez et al., 2001)

Tabla 1
Operaciones de biolixiviación de cobre en el mundo a través de los años (Watling, 2006)

Region/mine	Operation reserves (t)	Ore processed (t/day)	Cu production (t/year)
Lo Aguirre, Chile 1980–1996	Heap bioleach 12×10^6 at 1.5% Cu	Oxides/chalcocite 16×10^3	$14\text{--}15 \times 10^3$
Cerro Colorado, Chile 1993–	Heap bioleach 80×10^6 at 1.4% Cu	Chalcocite, covellite 16×10^3	100×10^3
van Zar, Chile 1994–	Heap bioleach 5×10^6 at 2.5% Cu	Oxides/sulphides 1.5×10^3	12×10^3
Quebrada Blanca, Chile 1994–	Heap/dump bioleach 85×10^6 at 1.4% Cu 45×10^6 at 0.5% Cu	Chalcocite 17.3×10^3	75×10^3
Punta del Cobre, Chile 1994–	Heap (bio)leach 10×10^6 at 1.7% Cu	Oxides/sulphides –	$7\text{--}8 \times 10^3$
Andacollo, Chile 1996–	Heap/dump bioleach 32×10^6 at 0.58% Cu	Chalcocite 15×10^3	21×10^3
Dos Amigos, Chile 1996–	Heap bioleach 2.5%	Chalcocite 3×10^3	–
Zaldivar, Chile 1998–	Heap/dump bioleach 120×10^6 at 1.4% Cu 115×10^6 at 0.4% Cu	Chalcocite 20×10^3	150×10^3
Lomas Bayas, Chile 1998–	Heap/dump 41×10^6 at 0.4% Cu	Oxides/sulphides 36×10^3	60×10^3
Cerro Verde, Peru 1977–	Heap bioleach — at 0.7% Cu	Oxide/sulphide 32×10^3	54.2×10^3
Escondida, Chile	Heap bioleach 1.5×10^9 at 0.3–0.7%	Oxides, sulphides	200×10^3
Lince II, Chile, 1991–	Heap leach 1.8% Cu	Oxides, sulphides	27×10^3
Toquepala, Peru	Heap leach	Oxides, sulphides	40×10^3
Morenci, Arizona 2001–	Mine for leach 3450×10^6 0.28% Cu	Chalcocite, pyrite 75×10^3	380×10^3
Equatorial Tonopah, Nevada, 2000–2001	Heap bioleach 0.31% Cu	25×10^3	25×10^3
Gunpowder Mammoth Mine, Australia, 1991–	In situ (bio)leach 1.2×10^6 at ~ 1.8% Cu	chalcocite and bornite –	33×10^3
Girilambone, Australia 1993–2003	Heap bioleach — at 2.4% Cu	Chalcocite/chalcopyrite 2×10^3	14×10^3
Nifty Copper, Australia, 1998–	Heap bioleach — at 1.2%	Oxides/chalcocite 5×10^3	16×10^3
Whim Creek and Mons Cupri, Australia 2006–	Heap bioleach 900×10^3 at 1.1% Cu 6×10^6 at 0.8% Cu	Oxides/sulphides	17×10^3
Mt Leyshon, Australia 1992–1997	Heap bioleach — 0.15%	Chalcocite 1.3×10^3	750
S&K Copper, Monywa, Myanmar, 1999–	Heap bioleach 126×10^6 at 0.5% Cu	Chalcocite 18×10^3	40×10^3
Phoenix deposit, Cyprus, 1996–	Heap (bio)leach 9.1×10^6 at 0.78% Cu 5.9×10^6 at 0.31% Cu	Oxide/sulphide –	8×10^3
Jinchuan Copper, China 2006–	240×10^6 at 0.63% Cu	Chalcocite, covellite, enargite	10×10^3

Desde finales del siglo XIX, la extracción de metales preciosos se realiza, generalmente, por el método de cianuración. Desde entonces, se han efectuado diversas mejoras y, en la actualidad, se continua usando, dada su simplicidad y ventaja económica para tratar diversos minerales (Iglesias, Carranza, & Palencia, 1998).

La aplicación comercial moderna de la biohidrometalurgia comenzó con la biolixiviación de cobre a partir de material subterráneo de grado minero. Kennecott Copper ha utilizado con éxito este proceso desde la década de 1950. Otras operaciones mineras en todo el mundo siguieron el ejemplo de Kennecott. Hoy en día, la biolixiviación en vertederos sigue siendo un proceso de muy bajo costo para eliminar el cobre de la roca que no puede procesarse económicamente por ningún otro método. A pesar del éxito comercial de la biolixiviación en vertederos, se han realizado pocos esfuerzos para mejorar el componente microbiológico de este proceso de lixiviación. La expansión de la biohidrometalurgia en la recuperación de otros metales no se produjo hasta mediados de la década de 1980, cuando se puso en servicio la primera planta comercial para el pretratamiento del concentrado de oro refractario en la operación de Fairview en Sudáfrica. Ahora, los procesos para la biolixiviación del cobre y el pretratamiento refractario del oro se diseñan teniendo en cuenta los microorganismos para promover su actividad. (Brierley, 2001)

2.2 Biotecnología Aplicada a la Minería

La biotecnología aplicada a la interacción entre sistemas biológicos (microorganismos, organismos y lo que engloba por definición) y la riqueza mineral, se conoce como biohidrometalurgia, que vendría a ser una rama de la hidrometalurgia. Este campo del conocimiento se enfoca en dos temáticas, como son la recuperación metálica

apoyado de las tecnologías de biolixiviación, y el tratamiento de purificación y neutralización de soluciones que provienen de las operaciones y procesos en la industria minería conocidas como tecnologías de biorremediación. El objetivo del estudio pertenece al área de la lixiviación microbiana y la recuperación metálica a partir de los minerales que los contienen, en consecuencia, será dirigida hacia el estudio de la tecnología de biolixiviación. (Lagos Miranda, 2009)

Se refiere a “biolixiviación” al mecanismo de hacer solubles a los metales y compuestos específicos a partir de sus minerales por acción directa y/o indirecta de microorganismos. La biolixiviación representa una alternativa económica para recuperar metales de interés a partir de sus minerales, especialmente minerales con contenido metálico de cabeza bajo y depósitos residuales de las operaciones de minería en la actualidad. Es importante su aplicación en los sulfuros complejos y minerales refractarios con contenido de metales preciosos, ya que al encontrarse ocluidos en la matriz y haciendo un pretratamiento bacteriano hace posible un postratamiento por cianuración convencional. Como todo proceso hidrometalúrgico, se caracteriza por la ausencia de emisiones de SO_2 , siendo amigable con el medio ambiente debido a la acción de los microorganismos involucrados. El proceso es importante ya que el fierro y azufre son oxidados por la acción microbiana. (Rivera et al., 2011)

2.2.1. Conceptos en la Biolixiviación.

La biolixiviación es un proceso que emplea microorganismos para disolver los minerales, liberando un metal de valor presente en un concentrado, que con métodos convencionales sería más dificultosa su extracción. La biolixiviación con la necesidad de mejorar la cinética de disolución, es catalizada por microorganismos que necesitan de la

energía REDOX para realizar sus funciones metabólicas como la respiración celular. En conclusión, la biolixiviación es un proceso químico porque involucra el agua y oxígeno atmosférico y un proceso biológico por la participación permanente de microorganismos. (Lagos Miranda, 2009)

2.2.1.1. *Acidithiobacillus ferrooxidans* y Otros Microorganismos.

“La mayoría de los microorganismos involucrados en la biolixiviación se diferencian por su crecimiento en medios ácidos (pH menor a 3), con elevada concentración en solución de iones metálicos, utilizando el ion ferroso y el azufre como fuente energética (Rawling, 1998; Watling, 2006)”.

At. ferrooxidans es una bacteria del género *Acidithiobacillus* que se desarrolla en un medio ácido, siendo su rango óptimo de pH entre 1.8 y 2.0. Tiene la capacidad principal para oxidar ion ferroso en solución, de esta manera absorbiendo la energía necesaria para el crecimiento bacteriano y fijación de CO₂ ya que necesita del oxígeno como último aceptor de electrones. La oxidación de minerales sulfurados es causada por el ion férrico del medio que luego es reducido a ion ferroso degradando el mineral de la matriz y repitiendo el ciclo. De esta forma durante el proceso de biolixiviación, *At. ferrooxidans* mantiene favorable la razón Fe³⁺/ Fe²⁺ el cuál se refleja en el relativamente alto potencial redox en la solución de lixiviación. (Grishin & Tuovinen, 1988)

“Las bacterias que se desarrollan en medio ácido, catalizando la degradación de la matriz del mineral sulfurado, son clasificadas en función a la temperatura donde promueven su crecimiento se dividen en tres grupos: mesófilas, termófilas moderadas y termófilas extremas (Rodríguez et al., 2001)”.

Las bacterias mesófilas comprenden un rango de crecimiento de temperatura entre 25°C y 45°C. Las bacterias autótrofas están comprendidas entre este grupo, utilizando el CO₂ para cumplir su necesidad de fijar carbono ya que es su principal fuente inorgánica; a diferencia de las bacterias heterótrofas y también bacterias categorizadas como mixotróficas, cuya manera de obtención es a partir de inorgánicas fuentes y ambos tipos de fuentes (orgánicas e inorgánica), respectivamente. (Kelly & Harrison, 1989)

Tabla 2

Características de las bacterias mesófilas con capacidad lixivianante (Rodríguez et al., 2001)

Microorganismo	Tamaño y forma	T (°C)	pH	Fuente de energía quimiolitótrofa
<i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	0,3- 0,5 x 1- 1,7 μ m Bacilo	5- 40 30- 35 óptima	1,2- 6,0 2, 5- 3 óptimo	Oxida a Fe ²⁺ y S ⁰
<i>Thiobacillus thiooxidans</i>	0,5 x 1,2 μ m Bacilo	10- 40 30- 35 óptima	0,5- 6,0 2- 3,5 óptimo	Oxida S ⁰ , no a Fe ²⁺
<i>Leptospirillum ferrooxidans</i>	0,2- 0,4 x 0,9- 1,1 μ m Espirilo	20- 45 30- 35 óptima	1,2- 4,5 2,5- 3 óptimo	Oxida Fe ²⁺ , no a S ⁰

Los microorganismos termófilos (arqueas del género *Sulfolobus*, *Acidianus*, *Metallosphaera* y *Sulfisphaera*, entre otras) que actúan en los procesos de biolixiviación se caracterizan por desarrollar sus funciones vitales básicas en medios ácidos, encontrándose su crecimiento óptimo entre 45 a 90° C de temperatura. Son de gran interés para la utilización en la biolixiviación de concentrados de minerales, dado que gracias a su participación se incrementa la cinética de disolución (lixiviación) con mayor grado a las bacterias mesófilas. (Norris, 1990 y Rohwerder et al., 2003)

Tabla 3

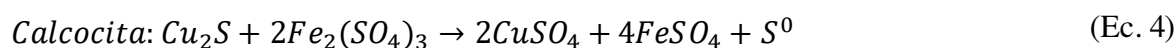
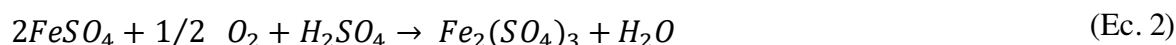
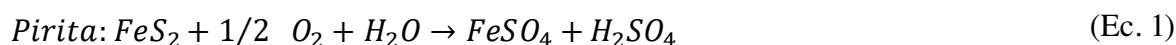
Características de las bacterias termófilas con capacidad lixiviante (Rodríguez et al., 2001)

Microorganismo	Tamaño y forma	T (°C)	pH	Fuente de energía quimiolitótrofa
<i>Leptospirillum thermoferrooxidans</i>	1,5- 3 x 0,20- 0,5 µm Espirilo, Vibrio	30- 55 45- 50 óptima	1,3- 4,0 1,65- 1,9 óptima	Oxida a Fe ²⁺ , no S ⁰
<i>Sulfobacillus thermosulfooxidans</i>	1 x 3 µm Bacilo	20- 60 45- 50 óptima	1,9- 3,0 1,9- 2,4 óptima	Oxida a Fe ²⁺ y S ⁰
<i>Sulfolobus acidocaldarius</i>	0,8- 1,0 µm Coco	55- 85 70- 75 óptima	1,0- 5,9 2- 3 óptima	Oxida S ⁰
<i>Sulfolobus sulfatarius</i>	0,8- 2,0 µm Coco	50- 89 75- 87 óptima	3- 5	Oxida a Fe ²⁺ y S ⁰
<i>Acidianus brierleyi</i>	1,0- 1,5 µm Coco	45- 75 70 óptima	1,0- 6,0 1,5- 2,0 óptima	Oxida a Fe ²⁺ y S ⁰
<i>Sulfobacillus acidophilus</i>	6- 10 x 0,5 µm Bacilo	45- 50	1,0- 6,0	Oxida a Fe ²⁺ y S ⁰

2.2.2. Mecanismos de la Lixiviación Bacteriana.

“Aunque todavía existen diferentes opiniones sobre los conceptos básicos de las vías de oxidación. Se postulan básicamente dos tipos de oxidación (Misari, 2016)”.

Según (Ho Lock, 2004): “La lixiviación indirecta se realiza cuando el Fe₂(SO₄)₃ en ausencia de oxígeno o de bacterias es responsable de la disolución o lixiviación de varios minerales sulfurados de importancia económica”. Proponiéndose las siguientes reacciones químicas:



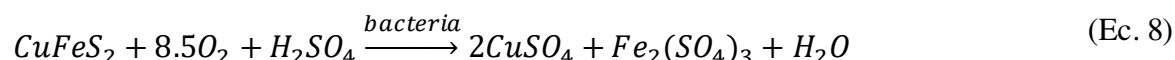
El mecanismo de lixiviación depende de la regeneración biológica del sulfato férrico (Ec.

2). El azufre (S^0) generado en las ecuaciones 3 y 4, puede ser convertido en ácido sulfúrico (H_2SO_4) por *T. ferrooxidans* según:



Es necesario mantener el pH a niveles muy bajos gracias al ácido sulfúrico ya que química y biológicamente condicionan la actividad bacteriana y su presencia.

La lixiviación directa refiere los sulfuros metálicos son solubilizados iónicamente. El proceso se describe en la siguiente reacción, donde “M” representa un metal bivalente:



Es posible que tanto la lixiviación indirecta como la directa ocurran de manera simultánea porque el hierro siempre está presente en ambientes de lixiviación natural.

La diferencia entre estas dos propuestas radica en el rol que desempeña los iones férricos en la disolución del mineral, en el mecanismo indirecto el mineral es lixiviado solamente por iones férrico en la solución, mientras que, en mecanismo directo el mineral es lixiviado por algún agente biológico. (Ho Lock, 2004)

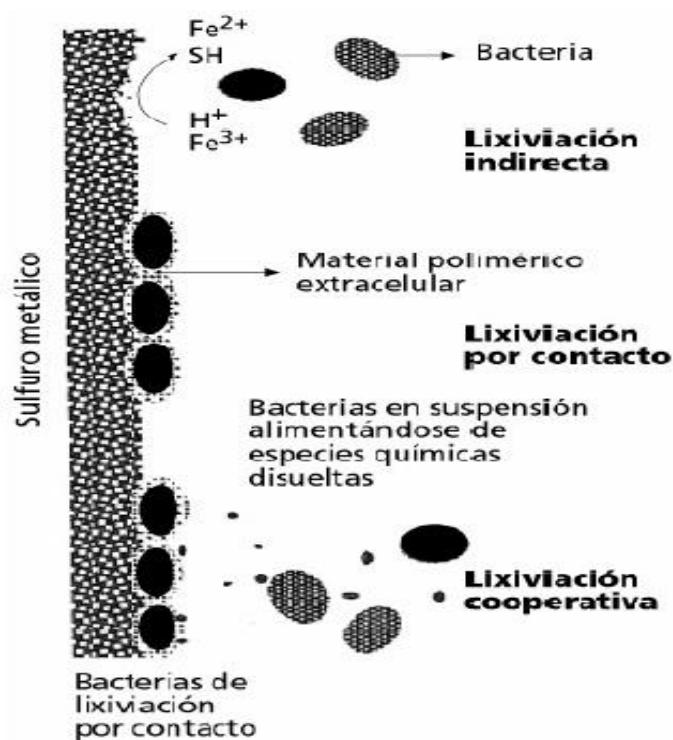


Figura N° 1. Esquema visualizando los distintos mecanismos de lixiviación de un sulfuro.
Fuente: (Tributsch, 2001)

2.2.3. Tecnologías basadas en biolixiviación.

La aplicación de la biotecnología (biolixiviación) está en función donde se empleará, el método a seguir, el porcentaje del contenido metálico de cobre en la cabeza y la granulometría del mineral, principalmente. Es por eso que se categoriza según el método para lixiviar. (Brierley, 2008; Pradhan et al., 2008)

2.2.3.1. Biolixiviación en Pilas.

Se procesa minerales procedentes de mina, reducidos en tamaño, con ley intermedia, con sulfuros primarios y secundarios para luego ser biolixiviados en pila o celdas.

Las pilas, en su mayoría, se construyen con material previamente reducido mecánicamente y transportado a depósitos de almacenamiento o llevado directamente a la

plataforma de lixiviación donde se forman. Las plataformas son previamente revestidas con polietileno de alta densidad (HDPE) y se instalan sistemas de drenaje con tuberías de plástico perforadas, permitiendo captar el PLS en la base. La red de línea de aire es instalada con el propósito de favorecer el suministro de oxígeno (mediante compresoras externas) requerido para el proceso.

Las pilas pueden ser dinámicas o permanentes, con remoción o caso contrario, sobre las mismas se forman otras. Se instala un sistema de aspersión (riego por goteo), garantizando el suministro integral a la pila con la solución lixivante agua y microorganismos. Previamente los microorganismos idóneos para el proceso son aislados en el laboratorio y cultivados adaptándolos condicionalmente, supervisando su crecimiento y metabolismo para luego llevarlos al proceso suministrándolos por los aspersores.

A pesar de que estos microorganismos están presentes naturalmente en la pila, el objetivo siempre es incrementar el rendimiento de la operación y esto se logrará con una adaptación previa como ya se mencionó en el párrafo anterior.

La solución suministrada logra infiltrarse a través de la pila y disuelve principalmente metales como el cobre presente en los minerales con contenido de azufre (sulfurados), dando presencia a una solución de sulfato de cobre (CuSO_4) cosechada por un sistema de recolección (drenaje), y trasladadas en canaletas (impermeables) hacia la planta donde se usará un solvente (selectivo al cobre) para la extracción del metal lixiviado. Aquí recuperamos cobre del PLS (solución cargada y drenada de las pilas) para luego dar forma a los cátodos en el proceso de electroobtención, siendo el ácido tratado (acondicionado) y utilizado nuevamente en el circuito para el riego de las pilas nuevamente, cumpliendo el ciclo de recuperación. Se establece y predice que para lograr mayor recuperación de cobre (entre 80 y 90%) se necesitan periodos de 8

a 10 meses de biolixiviación. Los bajos costos de capital y operación, la carencia de emisiones tóxicas y la minimización o la eliminación parcial o total de cualquier descarga de agua ya que son recirculadas las soluciones, son las principales ventajas de la biolixiviación en pila.

2.2.3.2. Biolixiviación en Botaderos.

Los minerales que no son económicamente rentables son procesados con esta tecnología, por ejemplo los minerales de cobre con ley menor a 0,5 % (baja ley). Debido a que el contenido en cobre aquí es significativamente mínimo para compensar la inversión para ser recuperado con la flotación y pirometalurgia (fundición). Las partículas fragmentadas de mayor tamaño de mineral son trasladadas y dispuestas en los botaderos que son áreas previamente acondicionadas. El agua y la solución lixivante es acondicionada con la finalidad de que los microorganismos lixiviantes se reproduzcan naturalmente, ya que se establecen aquellas condiciones óptimas para su desarrollo y aprovechamiento en su capacidad biolixivadora. En el botadero comienza la lixiviación bacteriana y en la base, la solución cargada con iones de cobre es dirigida hacia la planta de extracción por solventes, consecuentemente con la electroobtención, para posteriormente seguir con la producción y producción de cátodos de cobre, así como también en la lixiviación bacteriana en pilas.

2.2.3.3. Biolixiviación In Situ.

Método aplicado para minas ya explotadas (abandonadas) y también para las subterráneas, ya que los depósitos con presencia mineralógica económicamente atractiva no podrían ser procesados tampoco extraer los metales valiosos por los métodos clásicos (convencionales) al ser minerales de ley baja, depósitos pequeños u ambos, concluyendo la no rentabilidad en cuanto a su extracción. Previo a la lixiviación deben ser tronados. Debido a las

implicancias ambientales que conlleva la biolixiviación in situ, aplicación es mínima porque las soluciones ácidas son drenadas en un área de suelo no impermeable.

2.2.3.4. Biolixiviación en Tanques Agitados.

Se utiliza para minerales de ley intermedia a alta y concentrados de mineral, debido al capital y costos de operación asociados con esta tecnología. Se realizan en tanques implementados de agitadores mecanizados y suministro de aire insuflado por ventiladores, garantizando la presencia de O_2 y CO_2 , necesario para los microorganismos. En casos de biolixiviación se inocula microorganismos.

2.2.4. Biolixiviación en el Perú- Proyecto de Tamboraque.

El proyecto Tamboraque tenía como objetivo incrementar la capacidad en la conminución húmeda (molienda) a 600 TMD e implementar la planta, construyendo instalaciones con el objetivo de recuperar el oro y también la plata presente en la arsenopirita, al ser proyectado para ejecutarse en dos fases. En la primera fase se estimó 19,000 onzas de oro y 28,000 onzas de plata, con la finalidad de tratar la cantidad de 260,000 TM en relaves, con contenido de oro depositado anteriormente en 2 tanques de relaves. De esta manera, mediante un tratamiento biotecnológico se obtendría oro contenido en pirita y arsenopirita (en los concentrados) de los relaves en la flotación del zinc. (Ly Arrascue, 2006)

La mina Coricancha ubicada en el distrito minero Viso- Aruri se encuentra a 4000 m.s.n.m. de altitud, y Tamboraque (su planta) se encuentra a 3000 m.s.n.m. En cuanto a la ubicación de la planta, se encuentra en la localidad de San Mateo a 90 km del este de Lima (ciudad) referenciándonos de la carretera central. GoldFields cuenta con un proceso a detalle del diseño de la planta Tamboraque BIOX®, esta planta tiene una capacidad de

60 TMD (capacidad diseñada). El diseño está basado en la confiabilidad de la data de las pruebas en planta piloto. Las leyes del contenido metálico del concentrado de pirita presentaba de 4.6 a 5.5 g/TM en Au y 133 a 150 g/TM en Ag. (Ly Arrascue, 2006)

2.2.4.1. Descripción del Proceso.

El mineral de la mina Coricancha (200 TMD) es tratado con la finalidad de obtener concentrados de plomo y zinc. El relave de la flotación de zinc, conteniendo aproximadamente 3.14 y 33.9 g/TM de oro y plata respectivamente, se depositan en dos presas para relaves, para su postratamiento en las siguientes etapas próximas. (Ly Arrascue, 2006)

Tabla 4

Parámetros del Proceso en Tamboraque (Ly Arrascue, 2006)

pH	1.2- 1.8
Concentración mínima de OD	2 ppm
%Sólidos en masa	20
Tiempo de retención BIOX®	4-5 días
Temperatura	40- 45°C

2.2.5. Extracción de Cobre.

De acuerdo con (Brierley 2001), afirma que

En un futuro cercano, la biolixiviación en tanque agitado de los concentrados de calcopirita sería una realidad comercial. Una prueba piloto de un año en Copper Mines of Australia's Mt. Lyell en Tasmania, demostró la viabilidad técnica y comercial utilizando bacterias moderadamente termofílicas para filtrar un concentrado finamente molido y recuperar el cobre solubilizado con extracción por solvente y electrodeposición. (pág. 236)

Otro enfoque comercial para la lixiviación de concentrados de calcopirita es el uso de bacterias generando hierro férrico. Una alta concentración de hierro férrico es producido en un reactor separado, calentado a aproximadamente 70°C, y la solución férrica se pone en contacto con el concentrado de calcopirita. La lixiviación férrica ofrece varias ventajas sobre la oxidación completa de calcopirita. (Brierley, 2001)

Recuperaciones de cobre en el rango alto del 90% se logran especialmente cuando la calcopirita es finamente molida. El azufre de la calcopirita es oxidado a azufre elemental, no ácido sulfúrico, que reduce significativamente los costos de neutralización aguas abajo, y el azufre puede ser un producto vendible. Los costos de operación se minimizan en gran medida porque se requiere menos aire al oxidar el hierro ferroso que oxidar la calcopirita, un problema es el costo asociado con calentar la solución férrica antes del contacto con el concentrado y enfriar el licor ferroso antes de la recirculación al reactor bacteriano. La generación termofílica bacteriana de la solución de hierro férrico puede ser una respuesta ya que es necesario para mejorar el contacto entre el concentrado de calcopirita y la solución férrica. (Brierley, 2001)

2.2.6. Pretratamiento de Oro Refractario.

La presencia de oro, aunque en cantidades significativas, está intrínsecamente relacionada (asociación mineralógica) con sulfuros y/o arseniuros, haciendo difícil su tratamiento, motivo por el cual recibe la denominación de mineral refractario. En casi todos los casos, la cianuración de los minerales auríferos requiere periodos prolongados de lixiviación y puesto que la oclusión de los metales preciosos como el oro y plata dentro de la solución sólida (matriz sulfurada), la recuperación es más baja de lo esperada. Si bien es cierto, los concentrados refractarios auríferos son sometidos a

tratamientos como la tostación, calcinación y fusión para conseguir la oxidación y reducción de sus componentes, ocasionan problemas en el rendimiento metalúrgico como la baja recuperación, periodos prolongados, impacto negativo y perjudicial al medio ambiente, elevado consumo de reactivos y alto costo en la operación. (Arias Arce, 2005, pág. 5)

La biooxidación es un pretratamiento dirigido a un mineral refractario aurífero. El proceso BIOX®, tecnología aplicada como un pretratamiento a este tipo de minerales, requerirá de las bacterias mesófilas destructoras de la matriz sulfurada de los minerales logrando así la liberación de los metales preciosos, ocluidos en estos, para recién ejecutar el proceso de cianuración. Aquellas reacciones donde hay transferencia de electrones (redox) liberan energía en forma de calor (exotérmicas) llevándose esto en los biorreactores, porque es imperativo la supervisión en el control paramétrico de la concentración de oxígeno en solución, temperatura y grado de acidez, con el propósito de orientarnos hacia el incremento en la recuperación de los metales preciosos como el oro y la plata. Es de primer orden el considerar un monitoreo permanente de la configuración en los biorreactores, el efecto producido por las toxinas y la neutralización para la obtención de compuestos estables (precipitados). Las respuestas del proceso ya mencionado serán los beneficios directamente relacionados al medioambiente, significativos en comparación a otros, reflejados posible y necesariamente como una merma en CAPEX y OPEX. (Farroñay Yauri, 2011)

De acuerdo con lo descrito por (Ospina et al., 2012) afirma que

El Pretratamiento de biooxidación de un mineral refractario puede realizarse en montones, similares a los utilizados para la biolixiviación de cobre. Este proceso aún no

se ha practicado a escala, sin embargo, Newmont Gold demostró la practicidad del pretratamiento de biooxidación en montones a gran escala.

“La biooxidación es un método utilizado en el pretratamiento oxidante de menas refractarias, algunas veces como una alternativa a los procesos de calcinación y lixiviación a presión (autoclave).” (pág. 136)

En procesos de biooxidación uno de los principales factores a considerar es la presencia de concentraciones altas de arsénico originarias en la disolución de la arsenopirita. El arsénico en altas concentraciones tiene papel protagonista en cuanto al decaimiento de la actividad bacteriana debido a que interfiere en el proceso metabólico bacteriano de formación de ATP (energía necesaria para desarrollar sus funciones básicas), debido a la formación de un complejo ADP- arsénico, inestable, siendo partícipe en la inhibición de la cinética de crecimiento. (Harvey & Crundwell, 1996)

2.2.7. Ventajas y Desventajas de su Aplicación.

Tabla 5

Ventajas y desventajas de la lixiviación bacteriana. (Vallejo Gavira, 2015; Rodríguez et al., 2001)

Ventajas	Desventajas
Permite el tratamiento de minerales metálicos, de ley (proporción de metal en el mineral) baja.	Velocidades de reacción lentas.
No habrá emisión por gases de azufre, protegiendo al medio ambiente de la formación de lluvia ácida.	Las aguas ácidas generadas en estos procesos deben ser tratadas antes de su vertido, aunque generalmente se trabajan en ciclo cerrado y se recirculan al proceso.

Consumo reducido de ácido sulfúrico, porque las bacterias producen ácido en su metabolismo.	Instalaciones que requieren fuertes inversiones en tecnología (biotecnología).
Fácil extracción de los compuestos del metal lixiviado para su posterior tratamiento y obtención del metal en estado de oxidación cero.	Actualmente sólo aplicable por motivos económicos, a metales cuyo valor en el mercado, sea elevado: Cu, Au, U, entre otros.
Consumo energético menor, debido a que la temperatura nunca excede de los 100 ° C en el proceso.	

2.2.8. Factores que Afectan la Biolixiviación.

Existen factores presentes en todo proceso, en la biolixiviación estos influyen de manera directa (multidireccional) en la respuesta llevada a cabo por los microorganismos involucrados, estos son:

Acidez

“Las bacterias acidófilas, es decir que crecen en medios ácidos, siendo incapaces de desarrollarse a un pH mayor de 3.0. El pH define que especies de bacterias se desarrollarán en el medio (Pradhan et al., 2008)”.

Oxígeno y Dióxido de Carbono

El aire juega un papel fundamental en este tipo de procesos aportando oxígeno y dióxido de carbono, requeridos fundamentalmente en la biolixiviación, siendo fundamental el aseguramiento de la aireación sea cual fuese la tecnología a emplear. El oxígeno participa como oxidante por los microorganismos mientras que el dióxido de carbono es necesario ya que es la principal fuente del elemento carbono encaminando la sintetización de la arquitectura celular y/o producción de biomasa. (Pradhan et al., 2008)

Nutrientes

Los microorganismos necesitan de fuentes nutricionales para su desarrollo, algunas bacterias lo obtienen del mismo mineral, como amonio, fosfato, azufre, iones metálicos (como Mg^{+}), entre otros. Un elemento que ayuda a fijar el dióxido de carbono y el fósforo es el magnesio siendo empleado para el metabolismo energético. (Pradhan et al., 2008)

Fuente de Energía

El ion ferroso y el azufre inorgánico son la principal fuente de energía que utilizan los microorganismos. En la biolixiviación, el ion ferroso (Fe^{+2}), no es necesario añadirlo, ya que la bacteria oxidará este ion proveniente de los minerales sulfurados que contengan este elemento metálico. (Pradhan et al., 2008)

Temperatura

Los microorganismos son clasificados en función al rango de temperatura. Así los microorganismos mesófilos se desarrollan con eficiencia en un rango entre 30 y 40°C, pero las moderadamente termófilas cercanas a los 50°C, por último las extremadamente termófilas por encima de las mesófilas y moderadamente termófilas mayor a 65°C. Cuando el medio posee una temperatura que sea por debajo de 5°C originará una acción de inactividad, pero llevándolo al rango medio de temperatura, los microorganismos volverán a reactivarse, pero si la temperatura del medio se ve incrementada superando los 65°C entonces los microorganismos morirán. Es posible el control de la temperatura pero dependerá mucho del diseño biotecnológico y la ingeniería empleada, ya que las reacciones REDOX en este proceso son exotérmicas. (Pradhan et al., 2008)

Presencia de Inhibidores

“Durante el proceso de biolixiviación se van acumulando metales pesados como zinc, arsénico y hierro en la solución de lixiviación. En ciertas concentraciones resultan tóxicos para los microorganismos, esto se soluciona al diluir la solución lixivante (Pradhan et al., 2008)”.

Potencial Redox (Eh)

“La medida del potencial es un indicador de la actividad microbiana, la relación es directa entre el potencial y la actividad microbiana, El flujo de electrones (transferencia) hace posible la oxidación de las especies y la reducción de otras (Pradhan et al., 2008)”.

Tamaño de Partícula

“A menor tamaño de la partícula de mineral, mayor es el área de contacto que tiene el microorganismo, haciendo más efectiva la lixiviación (Pradhan et al., 2008)”.

Irrigación

Se tiene la creencia de que la irrigación de manera no continua contribuye a la disolución de los metales. Dicho esto, la solución ácida (ataque) se irriga, pulveriza o dosifica intermitentemente por encima del stock pile (en la superficie amontonada) y se da el tiempo necesario permitiendo una adecuada filtración antes de reiniciar con la aplicación del riego, induciendo efectivamente un efecto llamado capilar pero de manera inversa, promoviendo la lixiviación de mineral de granulometría gruesa. (Pradhan et al., 2008)

Posiblemente sea inevitable la formación de precipitados dificultando la percolación que es un proceso que sucede de forma natural, teniendo como protagonista a

la solución lixivante a través de las pilas, cuando el medio es alcalino. Un material poroso permitirá la mayor difusión de la solución ya que penetrará más en el área con mineral. Ganga como el sílice y granito exponen la susceptibilidad variable para la biolixiviación, ya que no son nutrientes para los microorganismos. (Pradhan et al., 2008)

Densidad en la Pulpa

“La biooxidación de sulfuros con densidades de pulpa mayores de 20% en reactores de tanque agitado no ha tenido buenos resultados (Rossi, 2001; Deveci, 2004)”.

“Al aumentar la concentración de sólidos aumenta la fricción entre las partículas en el interior de la suspensión (Deveci, 2002; Deveci, 2004)”.

“Las altas concentraciones de sólidos también limitan las velocidades de transferencia de oxígeno, por lo que se deben inducir grandes cantidades del suministro de este para oxidar a los sulfuros (Rossi, 2001)”.

Se ha intentado mejorar la aireación pero al hacerlo inevitablemente hay un aumento en la velocidad de agitación, y como consecuencia un incremento en la cohesión entre partículas tratadas en suspensión. Es por ello que a mayor densidad de pulpa la velocidad de transferencia de oxígeno se hace menos eficiente y requerirá mayor tiempo de contacto entre el mineral y la solución bacteriana. (Rossi, 2001)

Sustrato de Mineral

Los carbonatos y gangas incrementarán el pH en la solución lixivante e inhibirán parcial o completamente las funciones principales de las bacterias, necesarias para la disolución del sulfuro. Para mantener la solución lo suficientemente ácida promoviendo

el crecimiento bacteriano, se logra mediante la adición de ácido. Una granulometría más fina significará un incremento en el área superficial de contacto, y como consecuencia habrá un incremento en el rendimiento de la solubilidad de los metales. El tamaño menor a $42\ \mu\text{m}$ sería considerado ideal para una muestra específica, pero en general óptimo para ser considerado. (Ramírez Oscoco, 2015)

2.3 Diagrama de Estabilidad Eh- pH

Gracias a la termodinámica, podemos identificar los elementos y compuestos producidos en la biooxidación. En este caso nos compete identificar la estabilidad de los productos del cobre y hierro generados en un proceso de biooxidación y los diagramas de Pourbaix permitirán hacerlo. (Muñoz Portero, 2001)

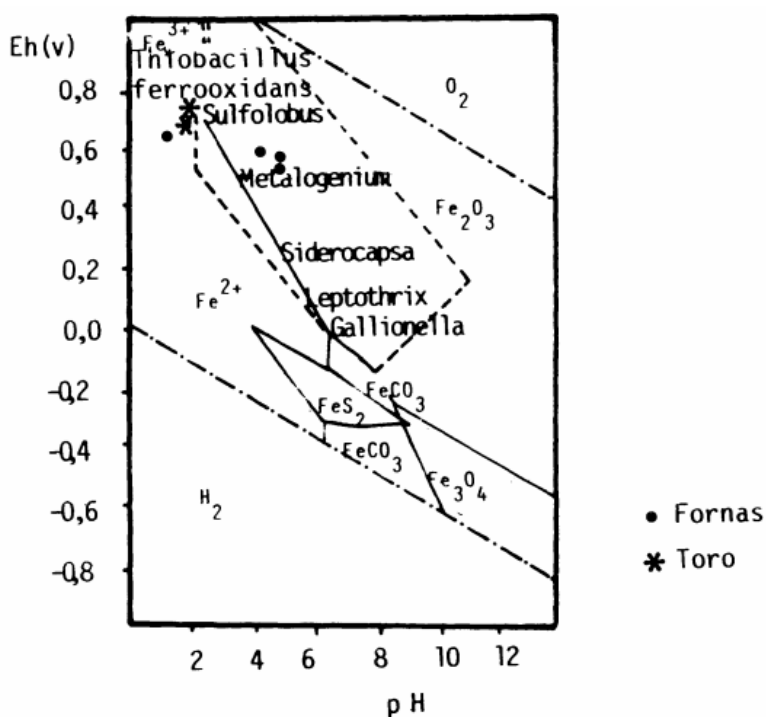


Figura N° 2. Diagrama Eh-pH de estabilidad del hierro en solución, involucrado con los principales grupos de bacterias oxidantes del Fe. • Mina de Fornas, * Mina de Toro.

A un valor aproximado de 2 en el pH y entre 600 y 800 mV en el potencial de oxidación (Eh), se han logrado adaptar y desarrollar las bacterias del tipo Acidithiobacillus ferrooxidans.

Fuente: (Grant & Long, 1985)

Las áreas termodinámicamente estables de las especies, sean acuosas o sólidas dependen del potencial y del pH a una temperatura dada, nos muestran si el metal es estable termodinámicamente o inmune a la disolución, y si ciertas condiciones que provocan su degradación para dar formación a iones o conversión en óxidos, hidróxidos, hidruros o sales metálicas produciendo pasivación. (Álvarez Vásquez, 2015)

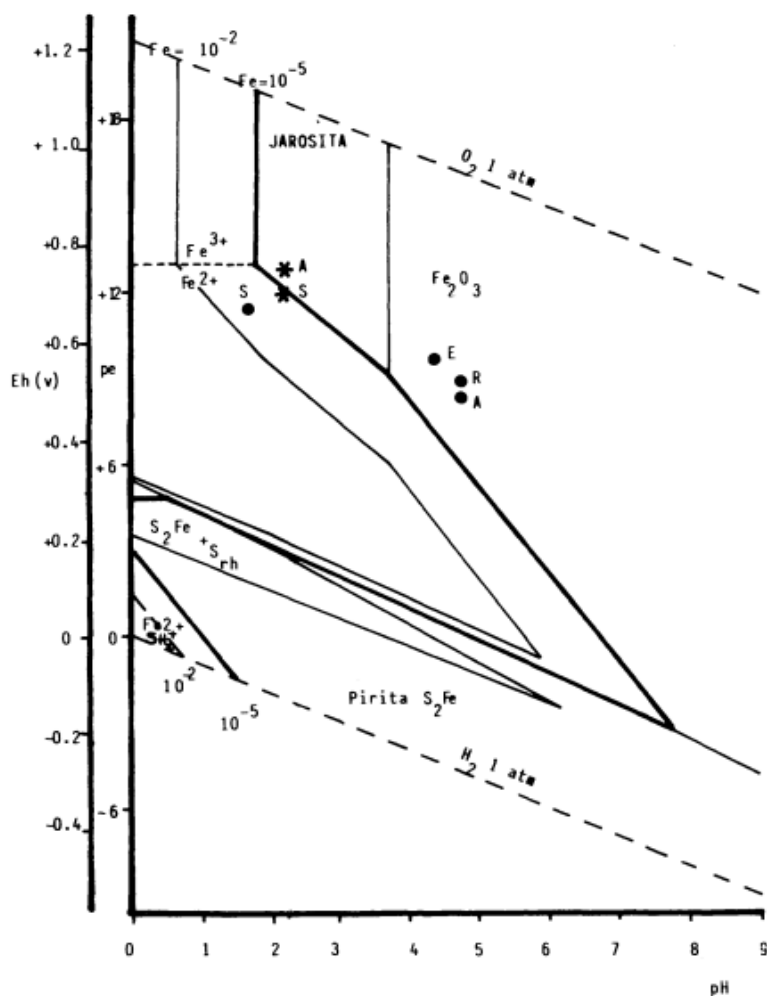


Figura N° 3. Diagrama Eh- pH de Pirita, -S rómbico, Fe_2O_3 amorfo, jarosita y $K^+ \cdot SO_4^{2-}$, Fe^{2+} y Fe^{3+} disueltos a un $\log [SO_4^{2-}] = -2.3$, $\log [K]^+ = -3.3$ a $25^\circ C$ y 1 atm.

Así mismo, situación de las condiciones de las aguas de escorrentía superficial. Mina de Fornas, *Mina de Toro. A: Agua; S: Sedimento; E: Escombrera; R: Río Fornas.

Fuente: (Van Breemen, 1973)

2.4 Sulfuros Capaces de Ser Biolixiviados

La discusión de la capacidad de disolución mediante *At. ferrooxidans* proviene desde los años 50. El Fe^{3+} es un excelente agente lixiviador de los sulfuros metálicos, al menos una mayor parte, siendo el *At. Ferrooxidans* regenerador del ion férrico.

Resultando obvio el postulado de que esta bacteria beneficiará a la lixiviación de los sulfuros promoviendo un incremento de la alta concentración del ion férrico presente en la solución. (Misari, 2016)

“En caso de no encontrarse Fe^{3+} en el cultivo, y la presencia de O_2 y pH bajo favorecería la oxidación de la superficie de la partícula mineral sulfurada en la cual se liberarán cationes metálicos proveniente de esta (Misari, 2016)”.

“La oxidación de azufre elemental por acción de las bacterias favorecerá los procesos de difusión en la interface acelerando así la disolución. Por ello es considerado que la oxidación mediante ion Fe^{3+} es mucho más importante cuantitativamente (Misari, 2016)”.

Tabla 6

Sulfuros principales capaces de ser oxidados en presencia de bacterias (Codelco, 2018)

Sulfuros	Fórmula química
Pirita y Marcasita	FeS_2
Pirrotita	Fe_{1-x}S
Calcopirita	CuFeS_2
Bornita	Cu_5FeS_4
Covelina	CuS
Tetrahedrita	$(\text{Cu, Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$
Enargita	Cu_3AsS_4
Arsenopirita	FeAsS
Rejalgar	As_4S_4
Oropimente	As_2S_3
Cobaltita	CoAsS
Pentlandita	$(\text{Ni, Fe})_9\text{S}_8$
Millerita	NiS
Polidimita	Ni_3S_4
Antimonita	Sb_2S_3
Molibdenita	MoS_2
Esfalerita	ZnS
Marmatita	$(\text{Zn, Fe})\text{S}$
Galena	PbS
Geocronita	$\text{Pb}_{14}(\text{Sb, As})_6\text{S}_{23}$

2.4.1. Biolixiviación de Pirita, Pirrotita y Marcasita.

La participación del *At. ferrooxidans* incrementa la cinética de la oxidación de los minerales en solución nombrados en el subtítulo. En efecto, las velocidades son marcadamente superiores a comparación de las obtenidas sin la presencia de estas bacterias, es decir con reacciones netamente químicas. Las reacciones importantes en la solubilidad de ocurriendo en menas que contienen estos sulfuros, ocurren a valores de potencial REDOX (Eh) por encima de los 700 mV. (Misari, 2016)

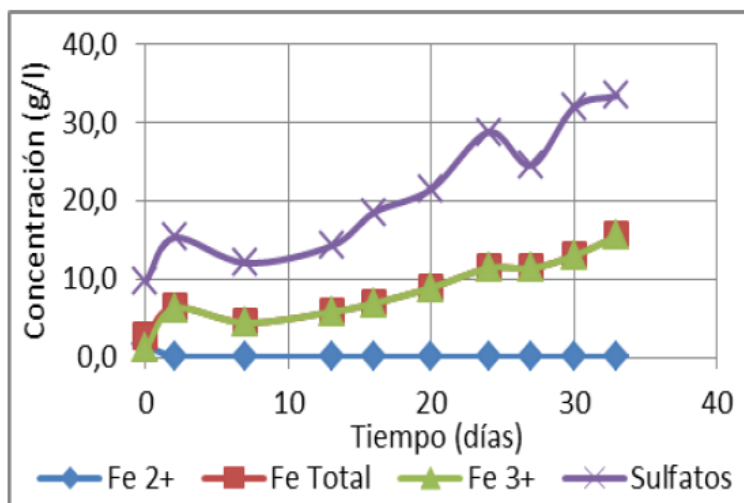


Figura N° 4. Concentración de hierro y sulfatos de mineral aurífero refractario de la biooxidación en el sistema batch.

El fierro en la solución se oxida pasando de ferroso a férrico desde las primeras horas.

Fuente: (Jaramillo & Aguirre, 2014)

La reacción de oxidación del Fe^{2+} en medio ácido moderado es:

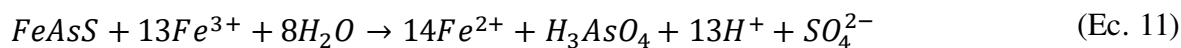
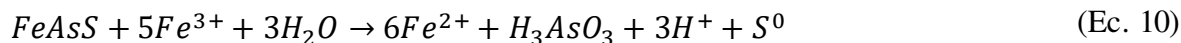


“Esta reacción es importante para la lixiviación de metales, pues permite la acumulación de biomasa bacteriana en minerales y soluciones, además de obtener un alto grado de oxidación de muchos sulfuros y producir un alto potencial redox en el medio (Codelco, 2018)”.

2.4.2. Biolixiviación de Arsenopirita.

La arsenopirita genera un vasto rango de compuestos finales, identificándolos por sus distintos estados en la oxidación refiriéndonos del S y el As, estando en función principalmente de sus condiciones en la oxidación. El azufre está presente como distintos compuestos intermedios, así como diversos sulfatos y el azufre elemental, mientras que el arsénico estará con sus estados de valencia de 3 y 5. (Malatt, 1999)

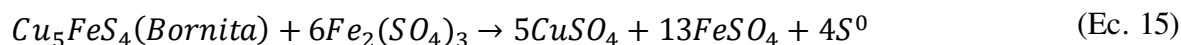
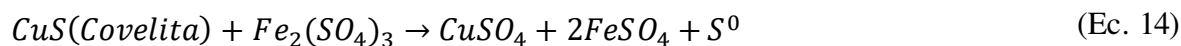
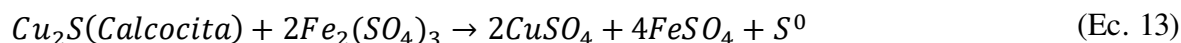
Según Malatt, las reacciones son las siguientes:



Otra vez, el ion Fe^{2+} es generado nuevamente por la reacción donde la bacteria actuó como catalizador.

2.4.3. Biolixiviación de Sulfuros de Cobre.

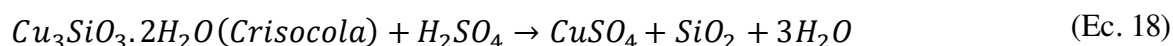
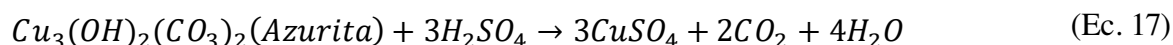
El Fe^{3+} acuoso, es directamente responsable en la lixiviación de ciertos minerales de importancia económica que contienen sulfuros de cobre y otros metales. Se proponen las siguientes reacciones:



Concluyéndose, que el mecanismo de lixiviación indirecta está sujeto a la regeneración del sulfato férrico (biológico). El azufre elemental generado durante el proceso puede ser convertido en ácido sulfúrico por *At. ferrooxidans* mediante:



El ácido generado y mantener un pH constante, es favorable a la acción bacteriana. Otras reacciones presentadas son las siguientes:



Estas reacciones son consideradas como sucesión de un cuarto mecanismo de lixiviación bacteriana llamada “lixiviación ácida”. Mecanismo de conversión, así como las reacciones galvánicas no son tomadas en consideración debido a que predominan los mecanismos directo e indirecto líneas arriba conceptuadas. (Sand et al., 1999)

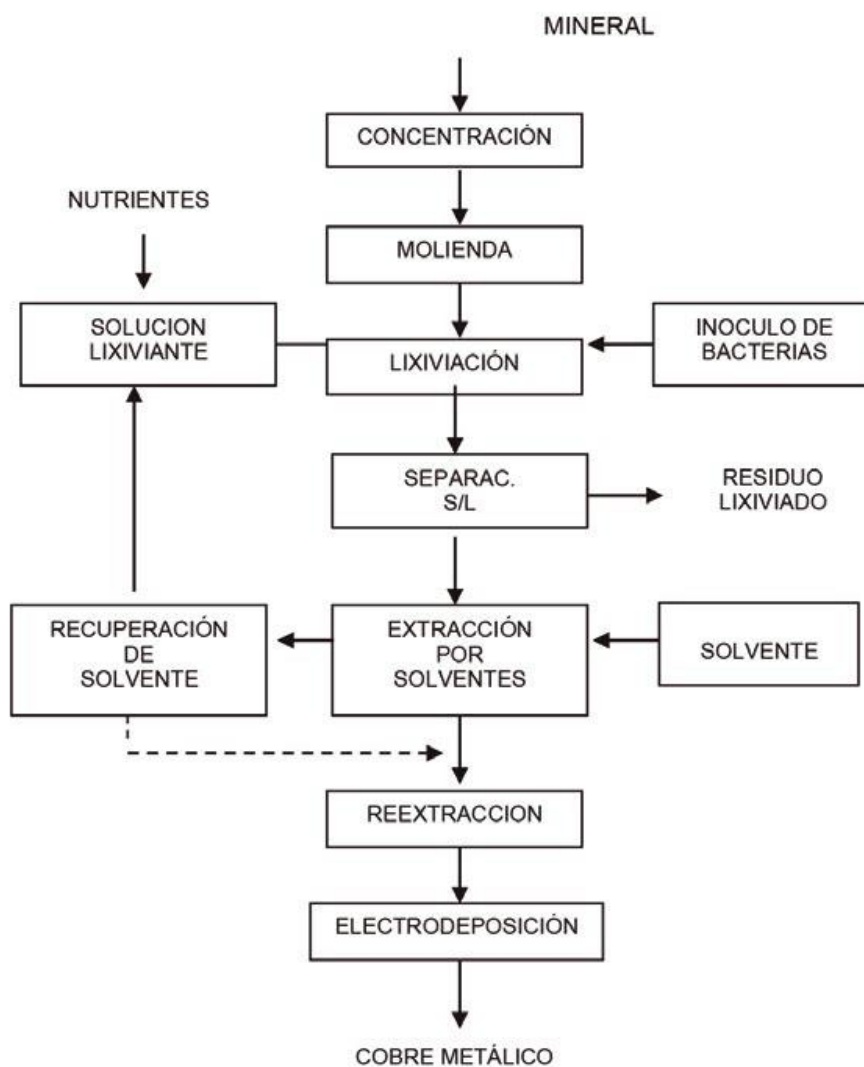


Figura N° 5. Esquema de un proceso de biolixiviación para la extracción de cobre de un concentrado de la flotación incluyendo la molienda de dicho concentrado.

Fuente: (Misari, 2016). BIOLIXIVIACIÓN, Tecnología de la Lixiviación Bacteriana de Minerales. Lima

2.4.4. Biolixiviación de Sulfuros de Zinc.

La característica del *At. Ferrooxidans* para poder oxidar Blenda o Esfalerita (ZnS) ha sido investigada y demostrada haciendo uso y poniendo en práctica con minerales que presentan sulfuros, o elaborando bajo condiciones de laboratorio un sulfuro de zinc (sulfuro sintético).

Dándose la siguiente ecuación:



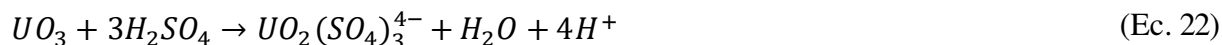
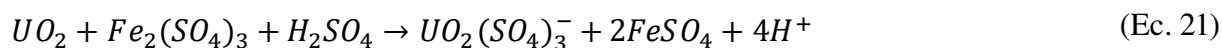
“Los costos de operación para la lixiviación microbiológica de concentrados de sulfuro de zinc incluyendo la recuperación de zinc por electrólisis, es comparable a un sistema de lixiviación ácida a presión (Misari, 2016)”.

2.4.5. Biolixiviación de Sulfuros de Plomo, Antimonio y Molibdeno.

En los yacimientos hay presencia de contenido variable en Esfalerita (siendo mínimo el contenido en fierro), Molibdenita, Galena y Sulfoarseniuro/Antimoniuros de cobre. Según los estudios, la lixiviación microbiológica de la Molibdenita reportó ser siete veces cinéticamente más rápida con la participación de los *At. ferrooxidans* a comparación de aquellas pruebas realizadas y documentadas sin la presencia de estas bacterias (con control estéril). Durante la oxidación de la Estibina por el *At. ferrooxidans*, el sulfato de antimonio (III) es hidrolizado parcialmente consiguiendo producir un sulfato donde está presente un óxido de antimonio (III). (Misari, 2016)

2.4.6. Biolixiviación de Minerales de Uranio.

La biolixiviación de uranio generalmente sigue un mecanismo indirecto en el que las bacterias proporcionan el hierro férrico requerido para oxidarse. Las reacciones que hacen posible la oxidación de los minerales con contenido de uranio se detallan a continuación:



“Se han incorporado aplicaciones comerciales de biolixiviación para extraer metales valiosos (...), el uranio en la actualidad se recupera a través de las principales técnicas de biolixiviación empleadas en pilas, vertederos y lixiviación in situ (Pradhan, 2001)”.

2.5 Efecto de la Aireación en la Biolixiviación

At. ferrooxidans necesita el oxígeno presente en el aire (bacteria aeróbica) porque usa el oxígeno receptor de electrones al final en el proceso de biolixiviación, sin embargo, sin la presencia de este elemento gaseoso, es aún posible su desarrollo metabólico en compuestos no orgánicos sulfurados, empleando fundamentalmente el ion Fe^{3+} como otro receptor también de electrones pero alternativo al oxígeno (Sugio et al., 1999).

“Siendo el ion férrico un receptor final de electrones alternativo una condición donde la cinética del crecimiento bacteriano de la *At. ferrooxidans* es más lenta a comparación de un ambiente oxigenado (Shively, Van Keulen, & Meijer, 1998)”.

En nuestro estudio, la disolución de arsénico se ve incrementada con la presencia de oxígeno inducido (aireación) y no es algo nuevo (...), como se mostró anteriormente, si la pulpa es más densa, habrá menor presencia de oxígeno y también cuando se burbujea

dióxido de carbono. Se sugiere un estudio complementario, especialmente orientado al estudio del efecto del oxígeno en solución (DO) en el sistema enfocado a la concentración del arsénico presente en solución. (Makita, 2004)

“Una alternativa de aumentar la solubilidad del oxígeno en agua es incrementando la fuerza impulsora, es decir, aumentando la presión parcial de oxígeno en la corriente de gas suministrada a la pulpa de lixiviación (Gwénaëlle Guezennec et al., 2016)”.

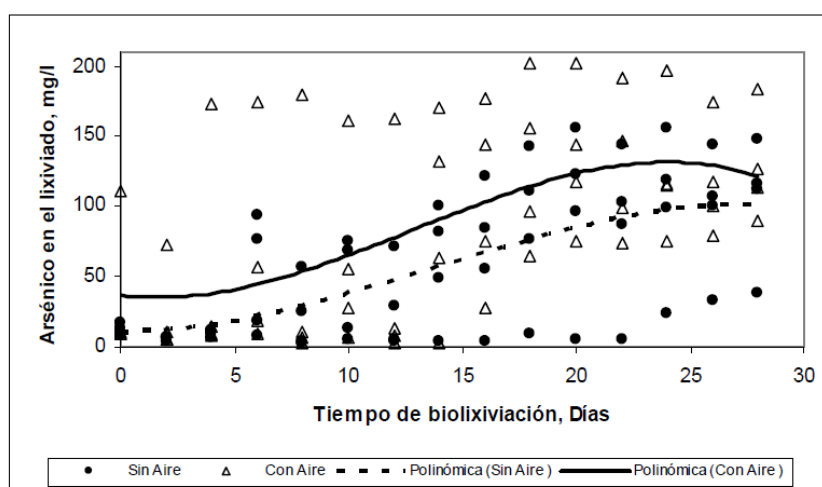


Figura N° 6. Respuesta a la inyección mecánica del aire en la lixiviación del arsénico. Hay un incremento en la concentración del arsénico en solución en la muestra con aireación.
Fuente: Makita, M. (2004)

2.6 Importancia del pH en la Biolixiviación

“El pH (medida de acidez o basicidad) influye muy significativamente en la cinética del crecimiento de ciertos microorganismos en contacto con el mineral (Das, Ayyappan, & Chaudhury, 1999; Gómez & Cantero, 2005)”.

De acuerdo con lo citado en (Mejía et al., 2011) afirma que

El incremento al inicio en el pH posiblemente se debe a los siguientes motivos: 1)

Presencia de carbonatos y silicatos en la solución lixiviante, esto generaría disminución

en iones hidrógeno debido a su consumo. (Sampson et al., 2005; Arroyave, 2007). 2) Consumo de protones (H^+) generado fundamentalmente en los monosulfuros como esfalerita, galena y calcopirita siendo mayor en la galena. (García et al., 1995; Da Silva, 2004; Ballester, 2005). 3) Oxidación del Fe^{2+} , proveniente de la matriz sulfurada en contacto con la solución bacteriana, y catalizado por acción de esta (Bevilaqua et al., 2002; Meruane y Vargas, 2003). (pág. 139)

2.7 La Importancia del Potencial Óxido Reducción en la Biolixiviación

Esta variable a tomar en cuenta está íntimamente relacionado al crecimiento y actividad de la *At. ferrooxidans*, ya que el crecimiento bacteriano acelerado será un indicador de que hay una muy buena adaptación de la bacteria a las especies mineralógicas presentes en la muestra tratada. Un aumento nos indicará indirectamente que ciertos iones solubilizados no inhiben las funciones necesarias de la bacteria para continuar con su actividad quimiolitótrofa, principalmente la oxidación del ion ferroso. (Xia et al., 2008)

El párrafo anterior podría ser explicado con lo que a continuación se plantea:

“El *Acidithiobacillus ferrooxidans* transforma rápidamente los iones ferrosos manteniendo las condiciones favorables durante el proceso (medio muy ácido y altos valores del potencial redox), puede ser la causa del impedimento de la precipitación de los productos de la oxidación (Prada Fonseca et al., 2016)”.

“La medida del potencial es un indicador de la actividad microbiana, mientras mayor sea el potencial medido, mayor será la actividad microbiana. El potencial óptimo es de 600 a 800 mV (Codelco, 2018)”.

2.8 Importancia de la Población Bacteriana en la Biolixiviación

El *At. ferrooxidans* tiene la función de: 1) Regenerar los iones férricos y/o los protones (H^+). 2) Concentrarlos en la interfase mineral/agua o mineral/célula bacteriana optimizando la degradación del mineral. En esta etapa tienen lugar los mecanismos de lixiviación bacteriana. (Sand et al., 1995)

“La variación del crecimiento bacteriano (bacterias/mL vs tiempo), durante la biolixiviación, es identificada en función de la concentración de la sal férrica ya que su fuente principal la obtienen de la oxidación del ion ferroso a férrico (Arias Arce et al., 2005)”.

En los procesos de biolixiviación se incluye una etapa previa de adaptación bacteriana, consistiendo en cultivos seriados y sucesivos donde los microorganismos cada vez más rápido disuelven los sulfuros presentes en el mineral y esto se relaciona directamente con un incremento en la población bacteriana y el potencial redox.

2.9 El Proceso de Cianuración en el Oro

Según lo citado por (Logsdon, Hagelstein, & Mudder, 2001) en su libro:

La hidrometalurgia involucra usar soluciones acuosas para recuperar, extrayendo elementos metálicos valiosos como el oro degradando la matriz sulfurada (biooxidación) y también elevar la concentración y la cinética de tratamiento en metales provenientes de sulfuros como el cobre (biolixiviación), entre otros.

En la lixiviación alcalina (conocida también como cianuración) se utilizan concentraciones muy bajas de cianuro (alta dilución), usualmente entre 0.01%- 0.05% de NaCN entre concentraciones de 100 y 500 ppm.

El cianuro de sodio es muy soluble en agua y en condiciones de oxidación mínimas, disuelve el oro ocluido en el sulfuro acomplejándolo.

La solución, luego de ser acomplejada o formada con el cianuro y el oro, es denominada “solución cargada” o “solución rica”. Luego se agrega zinc o carbón activado (dependiendo el tratamiento) y así recuperar el oro a partir de la solución cargada. La solución restante o “estéril” (es decir, carente o muy pobre en oro) se recircula con el propósito de extraer aún más oro o ser enviado a una planta de tratamiento residual, con el fin de recuperar el agua del proceso y acondicionándolo con el pH, cianuro de sodio a las condiciones y oxigenación volvería a ingresar al circuito parte de esta.

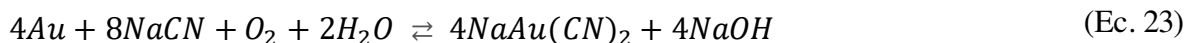
2.9.1. Cianuración.

El principio básico de esta reacción es la disolución selectiva sobre el oro y la plata presentes en los minerales a través de soluciones de baja concentración en cianuro de sodio (alcalinas débiles). La química en los procesos de agitación en tanques CIP, CIL y CIC es igual, pero aplicado en la irrigación de solución cianurada en las pilas.

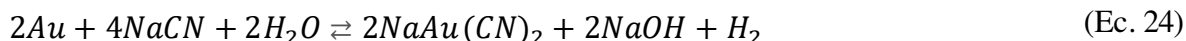
(Astuhuamán Pardavé, 2009)

Además, (Logsdon, Hagelstein, & Mudder, 2001) sostiene en su libro las siguientes reacciones de disolución de oro en soluciones diluidas de cianuro:

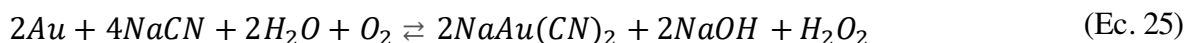
Ecuación de Elsner:



Ecuación sugerida por Janin:



Ecuaciones de Bodlaender:



“La disolución del oro ocurre a través de una serie de reacciones electroquímicas en las cuales el oxígeno se reduce en una parte de la superficie metálica (zona catódica), mientras que el metal se oxida (en la zona anódica) (Logsdon, Hagelstein, & Mudder, 2001)”.

2.9.2. Factores que Influyen en la Disolución de Oro.

Según (Marsden & House, 1992), son los factores influyentes a tomar en cuenta en la cianuración

Concentración del Cianuro

El ratio de disolución del oro sufre un aumento lineal relacionado a la concentración de la solución cianurada, hasta cuando un incremento en la concentración de cianuro no aumentará el oro disuelto; por el contrario, tendrá un ligero efecto negativo porque retardará el proceso.

Concentración del Oxígeno

El control de la concentración de cianuro es relativamente fácil comparada a la del oxígeno, debido a que el oxígeno es menos soluble en agua a condiciones ambientales. A nivel del mar y 25°C se estima en solución 8,2 mg O₂/L (0,082 g/L). Por ello, en condiciones ideales de agitación y aireación la máxima razón de la disolución por

parte del oro se podría dar en aquellas soluciones con concentraciones de 0,0098% NaCN (0,098 g/L).

Alcalinidad y pH

El proceso de cianuración es llevado en la práctica con valores de acidez y basicidad parametrizados a un pH superior a 9.4, para prevenir disminución en la concentración de la solución cianurada por pérdidas excesivas de esta sal por hidrólisis. Es importante señalar que a valores por encima de 9.5, el efecto del pH dependerá de los minerales encontrados como constituyentes de la mena, así como también de cal u otro álcali usado para regular el medio.

En ciertos escenarios, la cinética de disolución del oro decaerá con el aumento del pH, porque hay un incremento en la velocidad de las reacciones interferentes y distintas al acomplejamiento del oro.

Área Superficial y Tamaño del Oro

Generalmente, hay un incremento en la cinética de cianuración a un pequeño tamaño de partícula (mayor grado de liberación). Al disminuir el tamaño de partícula aumentan las reacciones en la competencia entre los demás elementos presentes en la solución y el mineral, por lo tanto, mediante pruebas metalúrgicas, es imperativo analizar y establecer una relación entre el porcentaje de extracción del oro, tamaño de la partícula y el consumo del cianuro, para encontrar el punto de equilibrio donde sea beneficiosa dicha relación y no haya pérdidas en cuanto a la recuperación de oro.

Efecto de la Agitación

El control en la disolución de oro se encuentra relativamente en función del transporte de masa y dependerá de cuan espesa sea la capa de difusión, por consiguiente, al haber un incremento en la agitación, habrá un incremento en la cinética de disolución hasta el punto donde este efecto no será significativo para el incremento de la recuperación de oro.

Procedentes de otros procesos o constituyentes de la mena

Algunos constituyentes presentes en la mena o preexistentes como reactivos químicos de operaciones precedentes u anteriores, podrían contribuir a inducir un efecto que podría ser negativo o positivo sobre el proceso de cianuración. Por ejemplo, los reactivos empleados en la flotación provocan un efecto inhibitor y algunos elementos presentes en la mena, que serán acomplejados también, interfieren en la reacción principal del oro y el cianuro.

Los constituyentes mineralógicos de la mena que contienen compuestos de Cu, Fe, Zn, Pb, As, Sb, entre otros, consumen CN^- y O_2 . Las sustancias carbonáceas absorben el oro disuelto, mientras que las arcillas generan inconvenientes en la recuperación cuando el oro, estando a similar tamaño de partícula al de las arcillas, se encontraría asociado mineralógicamente a estas. (Marsden & House, 1992)

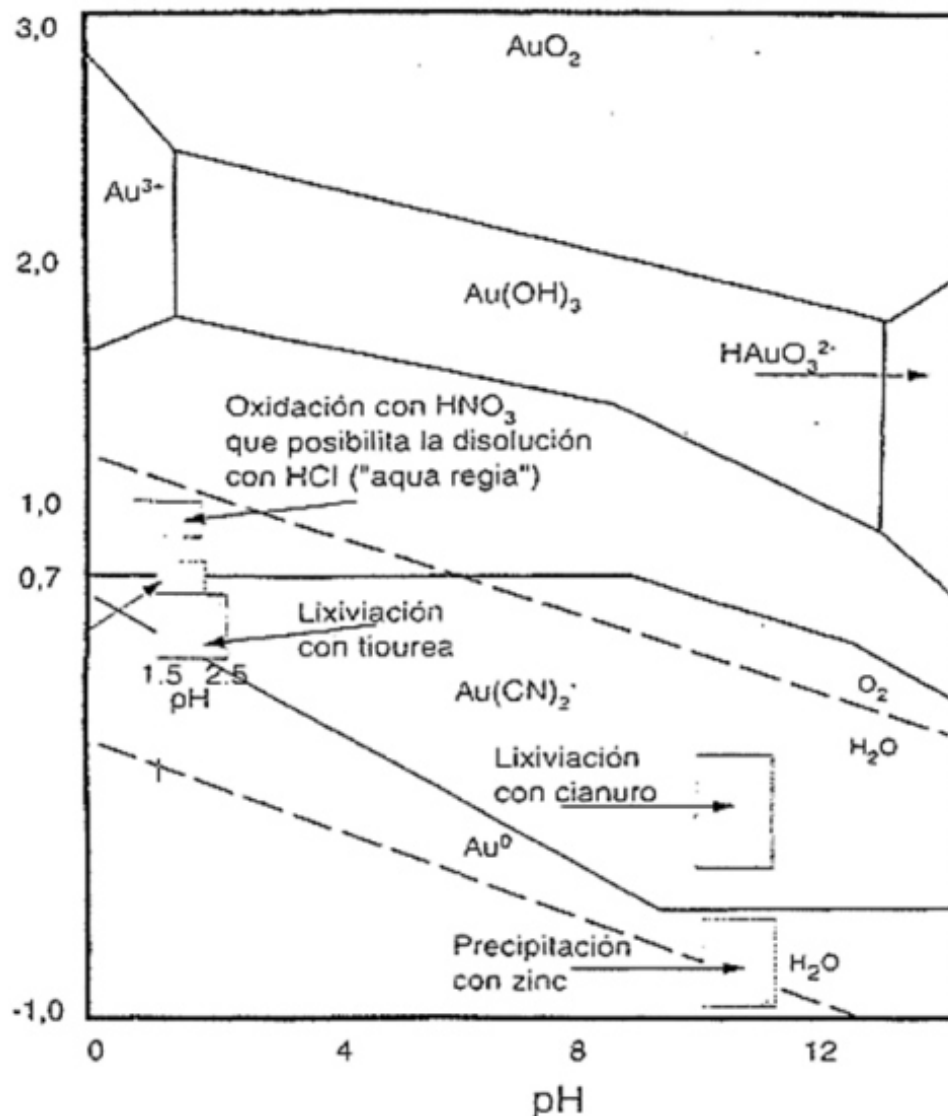


Figura N° 7. Diagrama Eh- pH y la acción del CN^- para un sistema de $\text{Au}-\text{CN}-\text{H}_2\text{O}$ a 25°C.
Fuente: (Álvarez Osorio, 2017)

2.9.2.1. Efecto de las Gangas.

Las gangas comunes como sílice, silicatos alcalinos y alcalinos-terrosos, no provocan efecto importante y significativo en las soluciones cianuradas. El estado de oxidación de los metales pesados influye en la acción de los sulfuros para acomplejarse. La cinética del sulfuro metálicos no descompuesto es lenta cuando es atacado por cianuro en solución, pero los sulfuros parcialmente degradados químicamente son más fáciles de

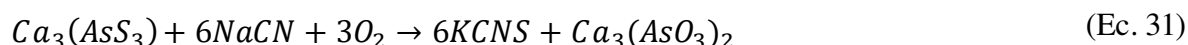
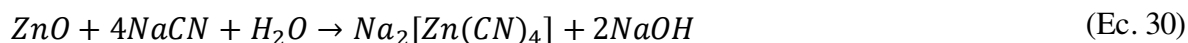
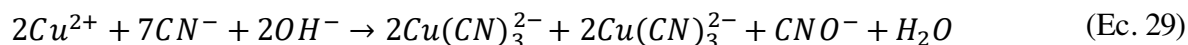
reaccionar con el cianuro y algunas veces actuando como cianicidas. (Álvarez Osorio, 2017)

2.9.2.2. Efecto de Iones Cianicidas.

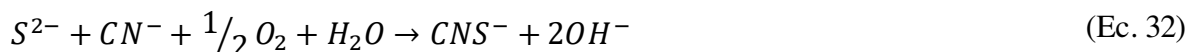
“Después desarrollar múltiples investigaciones sobre la disolución del oro en medio cianurado, este está controlado por la difusión del mismo. A nivel industrial los minerales, el cianuro y sustancias consumidoras de oxígeno afectan la velocidad de extracción del oro (Palacios, Gallegos, & Bernedo, 2002)”.



“La pirrotita, cobre, zinc, arsénico y minerales antimonizados consumen cianuro. Algunas reacciones de cianicidas son (Palacios, Gallegos, & Bernedo, 2002)”:



Debido a la presencia y existencia de minerales con contenido de azufre y/o sulfurados, habrá una reacción el oxígeno y el cianuro para formar tiocianatos, así como se muestra en la siguiente ecuación:



“Los iones metálicos comunes Cu^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} y Zn^{2+} forman con el cianuro complejos estables, consumiéndolo, de esta manera la actividad del cianuro es retardada (Palacios, Gallegos, & Bernedo, 2002)”.

Glosario de Términos

Acidificar	Hacer que una sustancia básica o neutra tenga las propiedades de un ácido.
Acidófilo	Un acidófilo es un organismo, o la estructura del cual, que se desarrolla preferentemente en un medio ácido. Suele tratarse de bacterias y otros organismos muy simples que son capaces de desarrollarse en condiciones de pH demasiado bajo para la mayoría de formas de vida.
Aireación	Es la renovación continua de aire para proporcionar oxígeno y otros gases a un medio.
ANOVA	La técnica de análisis de varianza (ANOVA) también conocida como análisis factorial y desarrollada por Fisher en 1930, constituye la herramienta básica para el estudio del efecto de uno o más factores (cada uno con dos o más niveles) sobre la media de una variable continua.
Análisis Granulométrico	La granulometría permite conocer la medida de los granos de los sedimentos. Mediante el análisis granulométrico se puede obtener información importante como: su origen, propiedades mecánicas y el cálculo de la abundancia de cada uno de los granos según su tamaño dentro de la escala granulométrica.
Análisis Mineralógico	Análisis cualitativos y cuantitativos para determinar la presencia de minerales en muestras sólidas cristalinas (minerales).
Análisis Químico	Un análisis químico es el conjunto de técnicas y procedimientos empleados en muchos campos de la ciencia para identificar y cuantificar la composición química de una sustancia mediante diferentes métodos.
Biohidrometalurgia	La biohidrometalurgia consiste en la extracción de metales a partir de minerales utilizando componentes que se encuentran en nuestro medio ambiente, como son: el agua, el aire y la presencia de microorganismos.
Biolixiviación	La biolixiviación es la extracción de metales desde minerales o menas a través del uso de organismos vivos, generalmente microorganismos o bacterias. Estos microorganismos se alimentan principalmente de arsénico y azufre, dos impurezas que hay que extraer del mineral para su limpieza.

Biominería	La biominería comprende una serie de procesos microbiológicos que pueden ser utilizados para la recuperación de metales a partir de los minerales.
Biooxidación	La biooxidación bacteriana es un proceso de oxidación causado por microbios donde el metal valioso permanece (pero se enriquece) en la fase sólida. En este proceso, el metal permanece en la fase sólida y el líquido puede ser descartado. La oxidación bacteriana es un proceso biohidrometalúrgico desarrollado para el tratamiento previo a la cianuración de minerales o concentrados de oro refractarios.
Biorremediación	La biorremediación es una rama de la biotecnología que trata el uso de organismos vivos como los microbios para eliminar contaminantes y toxinas del suelo y el agua.
Biotecnología	La biotecnología se refiere a toda aplicación tecnológica que utilice sistemas biológicos y organismos vivos o sus derivados para la creación o modificación de productos o procesos para usos específicos.
Cámara de Neubauer	Una cámara de Neubauer o hemocitómetro es un instrumento utilizado en medicina y biología para realizar el recuento de esporas y células en un medio líquido, que puede ser; un cultivo celular, sangre, orina, líquido cefalorraquídeo, líquido sinovial, etc.
Cepa Bacteriana	Conjunto de bacterias con iguales características biológicas, lo que significa que todas las células son de la misma especie, y es necesario transferir una pequeña colonia varias veces a sus características físicas (forma de colonia, color, tamaño, etc.)
Cianuro de Hidrógeno	El ácido cianhídrico o ácido prúsico es un gas tóxico de cianuro que se encuentra entre los venenos más potentes y de efectos más rápidos.
Cianuro Libre	Es el término utilizado para describir tanto al ion de cianuro $(CN)^{-1}$ que se disuelve en el agua del proceso como cualquier cianuro de hidrógeno (HCN) que se forma en la solución.
Cianuro Total	El cianuro total es la suma de los cianuros orgánicos, iones de cianuro libre, complejos cianurados y cianuro ligado a metales simples (excepto el cianuro en complejos de cobalto), pero no incluye a los tiocianatos $(SCN)^{-1}$.
Conteo Celular	Determinación de la concentración de células en una suspensión.

Diagrama de Estabilidad	Los diagramas de estabilidad termodinámica, en función del pH, constituyen una herramienta primordial en el análisis teórico de las interacciones de un sistema determinado.
Diagrama de Pareto	Un diagrama de Pareto es un gráfico en el que la información de los datos analizados se muestra mediante un diagrama de barras de forma descendente y en función de su prioridad.
Diseño Experimental	Los modelos de diseño de experimentos son modelos estadísticos clásicos cuyo objetivo es averiguar si unos determinados factores influyen en una variable de interés y, si existe influencia de algún factor, cuantificar dicha influencia.
Ganga	Desde el punto de vista mineralógico, la ganga comprende a los minerales que acompañan a la mena, pero que no presentan interés minero en el momento de la explotación (cuarzo, calcita, etc.).
Inóculo	Término colectivo para referirse a los microorganismos o sus partes (esporas, fragmentos miceliales, etc.) capaces de provocar infección o simbiosis cuando se transfieren a un huésped.
Iones Bactericidas	En general, son bactericidas los iones antimicrobianos que actúan inhibiendo la síntesis de la pared, alterando la membrana citoplásmica o interfiriendo con algunos aspectos del metabolismo bacteriano.
Iones Cianicidas	Son iones metálicos que consumen cianuro, inherentes a los minerales concentrados, pudiendo afectar en la recuperación de metales valiosos como la plata y el oro en la cianuración.
LMP	Medida de la concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente.
Medio de Cultivo	Un medio de cultivo es un conjunto de nutrientes, factores de crecimiento y otros componentes que crean las condiciones necesarias para el desarrollo de los microorganismos.
Mesófilo	En microbiología este término es aplicado a los microorganismos cuya temperatura óptima de crecimiento se encuentra entre 20 y 45 °C.
Microscopía Óptica	Es una técnica muy importante en la investigación de yacimientos metálicos, al brindar información base para modelar las características del mineral de mena, tales como sus texturas y estructuras, trama e intercrecimiento (secuencia paragenética) y el orden de aparición o

alteraciones, entre otras. Bajo esta técnica, se indica, es posible plantear modelos genéticos de yacimientos o aplicar tratamientos metalúrgicos.

Mineral Sulfurado	Minerales constituidos por el enlace entre el azufre y elementos metálicos, tales como el cobre, hierro, plomo, y zinc, entre otros.
Minerales Auríferos	Son ciertos minerales que están asociados característicamente con oro; los más importantes son: pirita, galena, blenda, estibina, arsenopirita, pirrotina y calcopirita. En algunos casos se tiene materia carbonosa asociada con minerales de oro. Los minerales de ganga más comunes son: cuarzo, feldespato, mica, arcilla y calcita.
Minerales Refractarios	Los minerales refractarios son aquellos en los cuales el metal no es recuperable por métodos simples y convencionales. En el caso del oro, cuando no es recuperado por concentración gravimétrica básica o por lixiviación simple. Son considerados minerales auríferos refractarios los que, por medio de procesos de cianuración, brindan una recuperación inferior al 75% del metal.
Oro Fino	El denominado oro fino estaría entre un rango de tamaños entre el oro grueso y el oro ultra fino, entre 200 y 10 micrones.
Oro Grueso	Vendría a ser el oro aluvial en forma de pepitas, el oro filoniano en forma de escamas o hilos, hasta un tamaño no menor a 200 micrones.
ORP	El potencial Redox (ORP) es una medida efectiva de medir la energía química de oxidación- reducción mediante un electrodo, convirtiéndola en energía eléctrica. Se expresa en milivoltios (mV).
Pilas de Lixiviación	La lixiviación en pilas es el método hidrometalúrgico más importante en la extracción de cobre. Luego de amontonar la muestra, una concentración diluida de ácido sulfúrico ($H_2SO_{4(ac)}$) es aplicado en la superficie de la pila desde donde percola a través del lecho mineral, disolviendo los minerales de cobre, para producir una solución enriquecida de cobre o PLS, que es colectada en una superficie inclinada e impermeable que se encuentra debajo de la pila, para ser transportada por medio de tuberías hasta la poza de soluciones ricas, y posteriormente a los circuitos de extracción por solventes y electro-obtención.

PLS

Sigla en inglés de la expresión (solución de lixiviación cargada).
(Pregnant Leaching Solution): se refiere a la solución que sale de las instalaciones de lixiviación (pilas, bateas, etc.) y que ha sido enriquecida por la disolución del cobre desde el mineral.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Hipótesis y Variables

3.1.1. Hipótesis.

“La evaluación del proceso de biolixiviación como pretratamiento al mineral aurífero refractario sulfurado de la provincia de Aija del departamento de Áncash, mejorará la recuperación de oro mediante el proceso de cianuración”.

3.1.2. Variables de la Investigación.

3.1.2.1. En el Pretratamiento de Biolixiviación.

Se busca la mayor concentración de fierro en la solución y se logrará solubilizando los principales minerales sulfurados como la piritita y arsenopiritita. Siendo la variable dependiente o variable respuesta, la disolución del fierro y arsénico expresado en su porcentaje de recuperación. Al ser un proceso de lixiviación con Fe^{3+} catalizado por la acción bacteriana y revisando la literatura científica en lixiviación y biolixiviación, entre las principales variables, elegimos las más importantes para ser consideradas y demostrar estadísticamente su influencia y significancia en la variable respuesta. Siendo el tamaño de partícula y el porcentaje de sólido como variables independientes a distintos niveles.

Tabla 7

Variables dependientes e independientes expresadas como función: $y = f(x)$, en el pretratamiento de biolixiviación

Variables dependientes (y)	Variables independientes (x)
Disolución de fierro en solución	Porcentaje de sólidos
Disolución de arsénico en solución	Mallas (Granulometría)

Con fines académicos y para estudios posteriores se incluyeron las lecturas del cobre y el zinc ya que se contaba también con esas lámparas en el laboratorio de absorción atómica de la EP de Ingeniería Metalúrgica. Pesa a contar con la lámpara de plomo, no se hizo la lectura porque al ser el pretratamiento en medio ácido y tener presente al azufre en forma de sulfuro (S^{2-}), este metal es muy poco soluble.

3.1.2.2. En el Postratamiento de Cianuración.

El porcentaje de oro en solución será la variable dependiente o respuesta, ya que al cianurar sin un pretratamiento la muestra, se obtiene en promedio recuperaciones del 20.07%. Siendo las dos variables independientes, en las revisiones bibliográficas, los principales factores en la cianuración convencional, demostraremos estadísticamente su influencia y significancia en la variable respuesta.

Tabla 8

Variables dependientes e independientes expresadas como función: $y = f(x)$, en el postratamiento de cianuración

Variables dependientes (y)	Variables independientes (x)
%Recuperación de oro en solución	Fuerza del Cianuro
	Mallas (Granulometría)

3.1.3. Operacionalización de las Variables.

Se empleará un diseño experimental factorial completo de dos niveles en el estudio de la biolixiviación. Mientras, para el estudio de la cianuración, se empleará un diseño experimental

factorial simple apoyándonos de un análisis estadístico en ambos casos con el software Minitab

18.

3.2 Caracterización de la Muestra

3.2.1. Análisis Mineralógico.

Tabla 9

Caracterización mineralógica

Minerales	Fórmula	Abreviatura
Pirita	FeS ₂	py
Arsenopirita	FeAsS	apy
Calcopirita	CuFeS ₂	cp
Galena	PbS	gn
Esfalerita	ZnS	ef
Boulangerita	Pb ₅ Sb ₄ S ₁₁	boul
Tenantita	Cu ₁₂ As ₄ S ₁₃ (Ag, Fe, Zn)	tn
Goetita	FeO.OH	gt
Enargita	Cu ₃ AsS ₄	en
Covelita	CuS	cv
Oro	Au	Au
Gangas	-	Ggs

Fuente: Caracterización mineralógica EP de Ingeniería Geológica UNMSM. (Arias Arce et al., 2015)

3.2.2. Grados de Liberación y Distribución Volumétrica.

Tabla 10

Grados de liberación y porcentaje de distribución volumétrica

Minerales	%Grados de liberación	Volumen porcentual
Pirita	95.06	45.30
Arsenopirita	93.90	13.12
Esfalerita	79.28	8.90
Galena	71.20	3.69
Calcopirita	84.21	1.90
Boulangerita	76.90	1.15
Tenantita	85.10	0.95
Goetita	100.00	0.20
Enargita	0	0.12
Gangas	97.50	24.61

Fuente: Caracterización mineralógica EP de Ingeniería Geológica UNMSM. (Arias Arce et al., 2015)

3.2.3. Representación Gráfica del Porcentaje de Distribución Volumétrica.

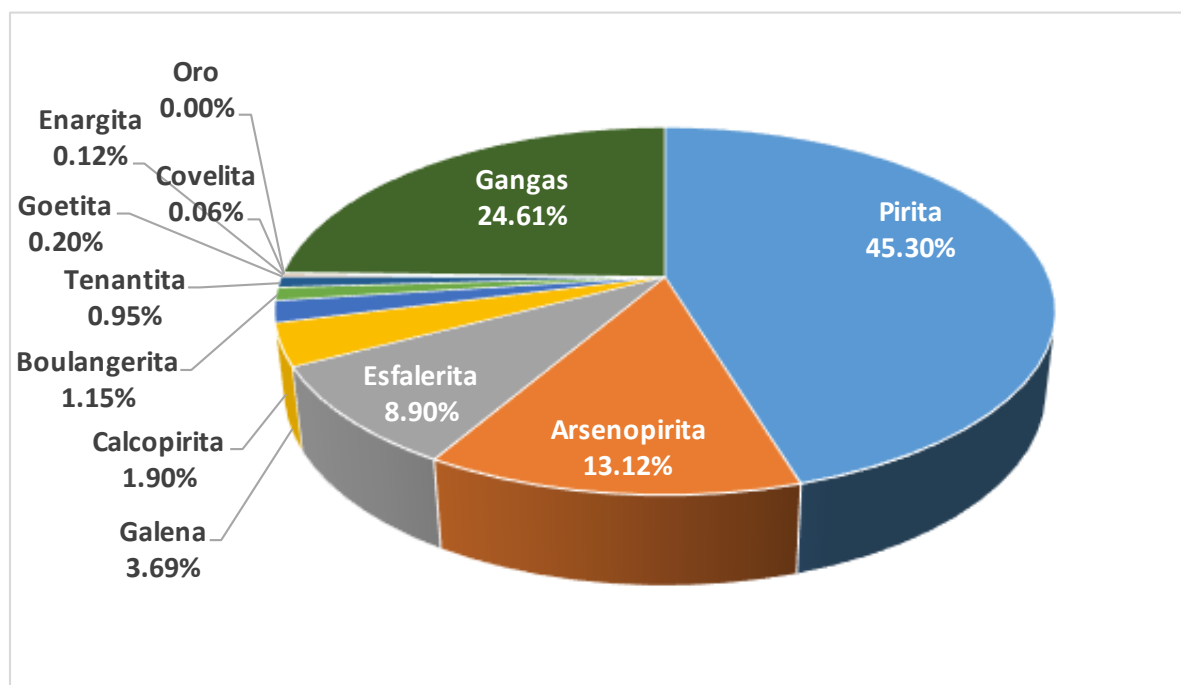


Figura N° 8. Gráfica del porcentaje de distribución volumétrica de la muestra.

Fuente: Caracterización mineralógica EP de Ingeniería Geológica UNMSM. (Arias Arce et al., 2015)

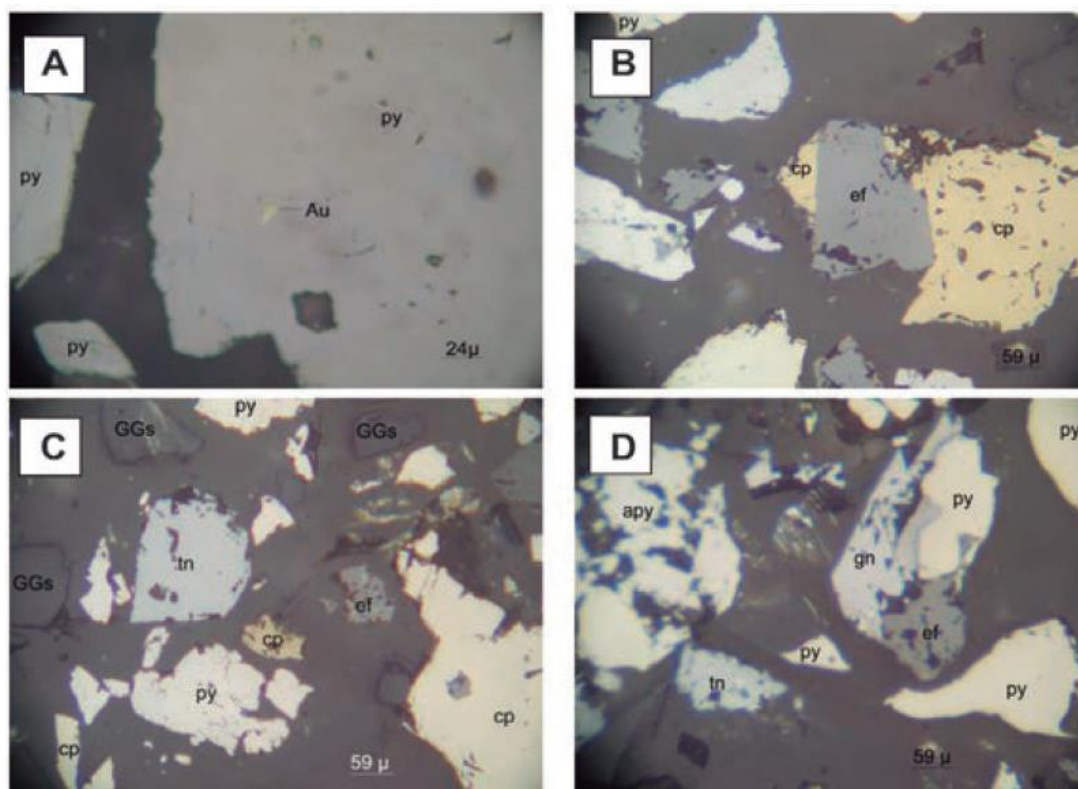


Figura N° 9. Vistas de microscopía óptica de minerales opacos en la muestra de cabeza.

A) Partículas libres de pirita (py) y entrelazadas de pirita (py) y oro (Au). 500X. B) Partículas de pirita (py), esfalerita (ef) partículas entrelazadas de calcopirita (cp) y esfalerita (ef). 200X. C) Partículas de pirita (py), calcopirita (cp), gangas (GGs) y tenantita (tn) y partículas entrelazadas de calcopirita (cp) y gangas (GGs). 200X. D) Partículas libres de pirita (py), arsenopirita y tenantita (tn) y partículas entrelazadas de pirita (py), esfalerita (ef) y galena (gn). 200X.

Caracterización mineralógica EP de Ingeniería Geológica UNMSM. (Arias Arce et al., 2015)

Según el estudio de caracterización mineralógica, el oro se encuentra en la matriz sulfurada de la pirita formando parte de la estructura cristalina como solución sólida y también se encuentra ocluido en la matriz de este mineral pero a tamaños muy por debajo a 24 micras. Mientras que la plata se encuentra presente en la tenantita principalmente.

3.3 Análisis Granulométrico

Se hizo el análisis granulométrico con un peso en seco de la muestra igual a 500 g.

Tabla 11

Tabla de resultados del análisis granulométrico

μm	Mallas	Peso en g	%Peso	%Ac. Ret.	%Ac. Pas.
150	100	59.57	11.91	11.91	88.09
75	200	114.26	22.85	34.77	65.23
45	325	74.81	14.96	49.73	50.27
	-325	251.36	50.27	100.00	0.00

Nota: Obteniendo así un 65.23% -200 mallas.

3.4 Análisis Químico

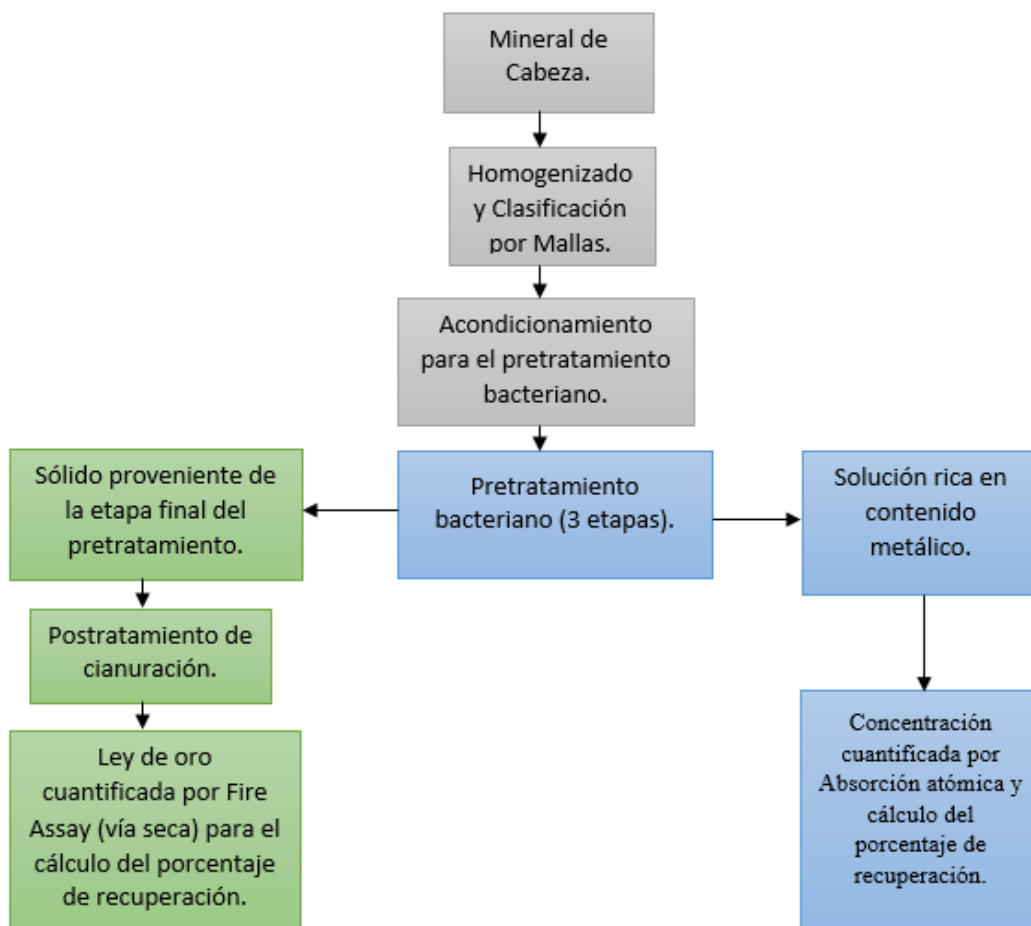
El contenido de azufre de la muestra de cabeza es igual a 21.20% como elemento.

Tabla 12

Tabla de resultados del análisis químico por mallas

Identificación de la muestra	Au oz/Tc	Ag oz/Tc	%Cu	%Zn	%Pb	%Fe	%As
88.09% -100 mallas	0.573	388	0.76	2.95	3.50	22.50	8.11
65.23% -200 mallas	0.576	522	0.92	3.46	4.80	21.24	10.89
50.27% -325 mallas	0.440	816	1.34	3.78	7.56	20.57	9.82

3.5 Diagrama de Flujo del Proceso



3.6 Plan de Ensayos

3.6.1. Pruebas de Biolixiviación como Pretratamiento.

El plan de ensayos de las pruebas de biolixiviación consta de un total de 24 ensayos para las 8 muestras a 3 diferentes granulometrías.

Antes de iniciar el contacto entre la pulpa y el inóculo bacteriano, el medio se acidifica a pH igual a 2 con solución de ácido sulfúrico diluido al 10%. Durante el proceso se mantiene controlado el pH. La temperatura promedio de trabajo en el laboratorio de Biometalurgia fue de 20°C.

Al término de cada etapa (4 días) se extraerá 180 mL de la solución (PLS) de cada matraz y será remplazada por agua potable. Solo la primera etapa de cada malla tendrán los nutrientes especificados en la composición del 9K.

3.6.1.1. Parámetros en el Pretratamiento.

Parámetros de trabajo de biolixiviación:

- A. Peso del mineral: 10.525, 22.220, 35.295 y 50.000 g
- B. Velocidad de agitación: 150 rpm
- C. Volumen de inóculo: 10%
- D. Caudal del Flujo de aire: 30 Litros por hora
- E. Granulometría del mineral:
 - a) 88.09% -100 mallas
 - b) 65.23% -200 mallas
 - c) 50.27% -325 mallas
- F. Medio de cultivo: 9K (medio líquido sin sulfato ferroso)
- G. pH de la pulpa: 2
- H. Temperatura: 20°C (temperatura ambiente)
- I. Principal bacteria empleada en la prueba: *Acidithiobacillus ferrooxidans*
- J. Número de etapas: 3
- K. Tiempo:
 - a) 0- 4 días = 1° etapa
 - b) 4- 8 días = 2° etapa
 - c) 8- 12 días = 3° etapa

Tabla 13

Plan de ensayos de las pruebas de pretratamiento

Mallas	Nro.	g	%S(w/w)	Aireación
88.09% -100 mallas	1	10.525	5	NO
	2			SÍ
	3	22.220	10	NO
	4			SÍ
	5	35.295	15	NO
	6			SÍ
	7	50.000	20	NO
	8			SÍ
65.23% -200 mallas	1	10.525	5	NO
	2			SÍ
	3	22.220	10	NO
	4			SÍ
	5	35.295	15	NO
	6			SÍ
	7	50.000	20	NO
	8			SÍ
50.27% -325 mallas	1	10.525	5	NO
	2			SÍ
	3	22.220	10	NO
	4			SÍ
	5	35.295	15	NO
	6			SÍ
	7	50.000	20	NO
	8			SÍ

Nota: Se empezará estratégicamente por la granulometría más fina 50.27% -325 mallas para tener una más óptima adaptación bacteriana para las posteriores mallas .

3.6.1.2. Diseño Experimental para las Pruebas de Biolixiviación.

El diseño experimental para el pretratamiento será un diseño factorial completo de dos variables (independientes), como las mallas (granulometría) y porcentaje de sólidos a diferentes niveles considerando la aireación. Las variables dependientes o respuestas será el porcentaje de recuperación de fierro y arsénico en solución.

El objetivo del pretratamiento es solubilizar la matriz sulfurada refractaria, principalmente de pirita, para lograr así liberar parcialmente las partículas de oro (cero grados de liberación), para así pueda ser posible una recuperación con cianuro en un postratamiento.

Variables	Niveles	Valores
%Sólidos en la pulpa	4	{ 5, 10, 15 y 20 }
		{ 88.09% -100 mallas }
Mallas	3	{ 65.23% -200 mallas }
		{ 50.27% -325 mallas }

3.6.2. Pruebas de Cianuración como Postratamiento.

Las muestras nro. 1 y 2 provienen de la mezcla del sólido con pretratamiento de la muestra 6 y 8 (con aireación) de granulometría 65.23% -200 mallas, se homogenizó y se extrajo 2 cantidades de 40 g para su posterior cianuración. No se hará un análisis granulométrico con esta mezcla, debido a que al haber sido oxidada por el ion férrico y la acción bacteriana, las partículas presentarán menos dureza comparado a su estado anterior (sulfuro) alterando sus propiedades mecánicas. De esta manera, con fines prácticos se mantendrá la nomenclatura de 65.23% -200 mallas.

Las muestras nro. 3 y 4 provienen de la mezcla del sólido con pretratamiento de la muestra 6 y 8 (con aireación) de granulometría 50.27% -325 mallas, se homogenizó y se extrajo 2 cantidades de 40 g para su posterior cianuración. No se hará un análisis granulométrico con esta mezcla, debido a que al haber sido oxidada por el ion férrico y la acción bacteriana, las partículas presentarán menos dureza comparado a su estado anterior (sulfuro) alterando sus propiedades mecánicas. De esta manera, con fines prácticos se mantendrá la nomenclatura de 50.27% -325 mallas.

Las muestras nro. 5 y 6 son muestras de cabeza, sin ningún tipo de tratamiento previo a la misma granulometría de la muestra nro. 1 y 2 en la cianuración.

No se efectuaron pruebas de cianuración con las demás muestras pretratadas por su poca cantidad en peso y además por la poca oxidación presenciada.

3.6.2.1. Parámetros en el Postratamiento.

Parámetros de trabajo de cianuración:

- A. Peso del mineral: 40 g
- B. Velocidad de agitación: 150 rpm
- C. Granulometría del mineral:
 - a) 65.23% -200 mallas (muestra pretratada)
 - b) 50.27% -325 mallas (muestra pretratada)
 - c) 65.23% -200 mallas (muestra sin pretratamiento)
- D. Medio: Agua potable
- E. Volumen de agua: 120 mL
- F. %Sólidos: 25
- G. pH de la pulpa: 11
- H. Temperatura: 20°C (temperatura ambiente)
- I. Tiempo: 48 horas
- J. Aireación: Sí
- K. Fuerza de CN^- : 500 y 1000 ppm

Tabla 14

Plan de ensayos de las pruebas de cianuración posbiolixiviación

Nro.	Mallas	Pretratamiento bacteriano	Aireación en la cianuración	Fuerza del cianuro (ppm)
1	65.23% -200 mallas	SÍ	SÍ	1000
2	65.23% -200 mallas	SÍ	SÍ	500
3	50.27% -325 mallas	SÍ	SÍ	1000
4	50.27% -325 mallas	SÍ	SÍ	500
5	65.23% -200 mallas	NO	SÍ	500
6	65.23% -200 mallas	NO	SÍ	1000

Nota: La fuerza de cianuro se representa como el radical CN⁻. Se estudiaron las muestras de cabeza nro. 5 y 6 (sin ningún tipo de tratamiento) con la finalidad de comparar los resultados.

3.6.2.2. Diseño Experimental para las Pruebas de Cianuración.

El diseño experimental para el postratamiento será un diseño factorial simple de 2².

Donde las variables independientes serán la granulometría en función a las mallas y la concentración del cianuro de sodio en ppm. La variable dependiente o respuesta será el porcentaje en la recuperación de oro obtenido en la solución (AA) y comprobado por ensayo al fuego (vía seca) del relave sólido.

Variables	Niveles	Valores
Fuerza del cianuro	2	{ 500 y 1000 }
Mallas	2	{ 65.23% -200 mallas y 50.27% -325 mallas }

CAPÍTULO IV

ENSAYOS EXPERIMENTALES

4.1 Biolixiviación como Pretratamiento a la Cianuración

4.1.1. Estudio de la Muestra a Tratar con Granulometría 88.09 % -100 mallas.

A continuación, se detalla el porcentaje de recuperación de los metales de interés (fierro y arsénico) en solución al término por etapa y en el acumulado durante las pruebas de biolixiviación.

Los análisis químicos fueron realizados por absorción atómica en la EP de Ingeniería Metalúrgica de la UNMSM.

Tabla 15

Porcentaje de recuperación de los metales de interés (fierro y arsénico) en solución al término de cada etapa durante las pruebas de biolixiviación

Etapas		1°				2°				3°				ACUMULADO			
G.	N°	Cu	Zn	Fe	As	Cu	Zn	Fe	As	Cu	Zn	Fe	As	Cu	Zn	Fe	As
88.09% -100 mallas	1	23.63%	36.24%	2.65%	2.83%	1.34%	3.12%	0.17%	1.03%	1.70%	1.14%	0.57%	2.13%	26.68%	40.51%	3.39%	5.99%
	2	25.68%	37.88%	7.91%	6.41%	3.75%	6.90%	4.78%	2.41%	3.85%	2.67%	3.75%	6.01%	33.29%	47.45%	16.44%	14.83%
	3	13.38%	18.00%	1.37%	2.11%	2.45%	4.19%	2.14%	1.37%	1.87%	0.95%	0.26%	1.57%	17.70%	23.14%	3.78%	5.06%
	4	14.64%	20.70%	3.94%	11.22%	3.35%	4.36%	10.48%	8.65%	3.66%	4.02%	4.17%	5.03%	21.64%	29.08%	18.59%	24.91%
	5	10.18%	14.77%	1.14%	6.01%	3.67%	6.08%	4.38%	9.43%	3.73%	6.34%	2.53%	7.55%	17.58%	27.19%	8.06%	22.98%
	6	10.54%	16.28%	1.81%	10.18%	3.33%	5.41%	7.69%	9.33%	3.95%	6.21%	5.27%	7.92%	17.81%	27.90%	14.77%	27.42%
	7	6.67%	8.89%	0.83%	4.71%	2.65%	3.78%	2.77%	4.50%	3.45%	4.36%	2.49%	4.03%	12.77%	17.04%	6.09%	13.24%
	8	6.83%	10.11%	3.11%	6.77%	2.97%	5.14%	4.89%	6.14%	3.06%	4.98%	4.37%	5.47%	12.86%	20.23%	12.37%	18.38%
65.23% -200 mallas	1	3.36%	2.95%	3.00%	3.18%	1.05%	0.85%	0.02%	1.35%	0.20%	0.11%	1.96%	0.65%	4.62%	3.91%	4.98%	5.18%
	2	6.24%	5.12%	4.68%	4.09%	2.17%	3.55%	0.43%	2.51%	0.26%	0.80%	2.88%	0.96%	8.67%	9.46%	7.99%	7.56%
	3	4.74%	5.01%	9.12%	9.46%	4.47%	1.86%	0.49%	4.28%	0.10%	0.13%	4.76%	1.59%	9.31%	6.99%	14.36%	15.34%
	4	5.24%	6.14%	10.13%	9.66%	3.26%	7.50%	4.24%	7.85%	1.74%	2.42%	4.85%	3.42%	10.23%	16.06%	19.22%	20.93%
	5	5.91%	6.51%	7.39%	8.51%	4.61%	10.37%	14.06%	11.77%	1.11%	4.02%	4.63%	9.87%	11.64%	20.89%	26.09%	30.15%
	6	5.02%	7.67%	6.97%	8.35%	3.82%	9.39%	17.24%	13.95%	1.09%	4.32%	4.93%	10.54%	9.93%	21.39%	29.14%	32.85%
	7	3.87%	3.26%	5.02%	5.42%	3.69%	5.92%	2.36%	2.46%	1.29%	1.65%	1.48%	3.35%	8.85%	10.84%	8.86%	11.22%
	8	3.67%	4.55%	3.52%	5.92%	2.67%	6.82%	8.72%	7.27%	0.91%	3.34%	2.49%	6.10%	7.25%	14.71%	14.72%	19.29%
50.27% -325 mallas	1	22.75%	35.62%	18.67%	19.47%	10.74%	17.50%	4.84%	5.62%	7.42%	5.28%	0.47%	5.78%	40.91%	58.39%	23.98%	30.87%
	2	29.94%	39.00%	28.52%	25.72%	23.74%	28.10%	12.14%	2.74%	21.68%	13.85%	3.70%	2.38%	75.36%	80.95%	44.36%	30.83%
	3	19.26%	27.13%	14.62%	13.97%	11.68%	15.89%	4.41%	2.59%	9.13%	6.66%	0.72%	3.43%	40.08%	49.68%	19.74%	19.99%
	4	20.57%	27.78%	16.38%	17.94%	18.66%	25.03%	5.21%	1.82%	17.20%	12.04%	6.96%	3.05%	56.44%	64.84%	28.55%	22.81%
	5	16.19%	24.12%	9.86%	12.39%	16.75%	23.89%	5.10%	1.90%	12.90%	10.48%	1.88%	2.18%	45.84%	58.49%	16.84%	16.47%
	6	16.17%	22.21%	8.36%	12.13%	18.59%	23.78%	4.62%	2.55%	17.15%	14.05%	6.52%	3.30%	51.92%	60.04%	19.49%	17.99%
	7	12.58%	15.57%	6.93%	8.55%	12.93%	22.33%	3.78%	2.16%	10.60%	10.05%	7.29%	5.35%	36.12%	47.95%	18.00%	16.05%
	8	11.76%	13.12%	6.01%	8.65%	11.06%	18.52%	2.66%	6.10%	18.92%	20.28%	4.81%	1.79%	41.74%	51.91%	13.49%	16.54%

Nota: Los valores en negrita son los resultados del análisis por absorción atómica en las muestras aireadas.

4.1.1.1. Recuperación de los Metales de Interés en 88.09%-100 mallas.

Comparación entre la recuperación de los metales en solución durante el tratamiento de biolixiviación de las 8 muestras y en 88.09% -100 mallas a las condiciones establecidas mostradas en la [Tabla 13](#), durante las 3 etapas.

Para determinar la concentración en solución al fin de cada etapa se usó las lámparas de Cu, Zn, Fe y As del equipo de espectrofotometría de absorción atómica perteneciente al laboratorio de Análisis Químico de la EP de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Tabla 16

Tabla de datos del %R Cu en solución de la 88.09% -100 mallas por etapa

		Aireación	1° Etapa	2° Etapa	3° Etapa	Acumulado
88.09% -100 mallas	1	No	23.63%	1.34%	1.70%	26.68%
	2	Sí	25.68%	3.75%	3.85%	33.29%
	3	No	13.38%	2.45%	1.87%	17.70%
	4	Sí	14.64%	3.35%	3.66%	21.64%
	5	No	10.18%	3.67%	3.73%	17.58%
	6	Sí	10.54%	3.33%	3.95%	17.81%
	7	No	6.67%	2.65%	3.45%	12.77%
	8	Sí	6.83%	2.97%	3.06%	12.86%

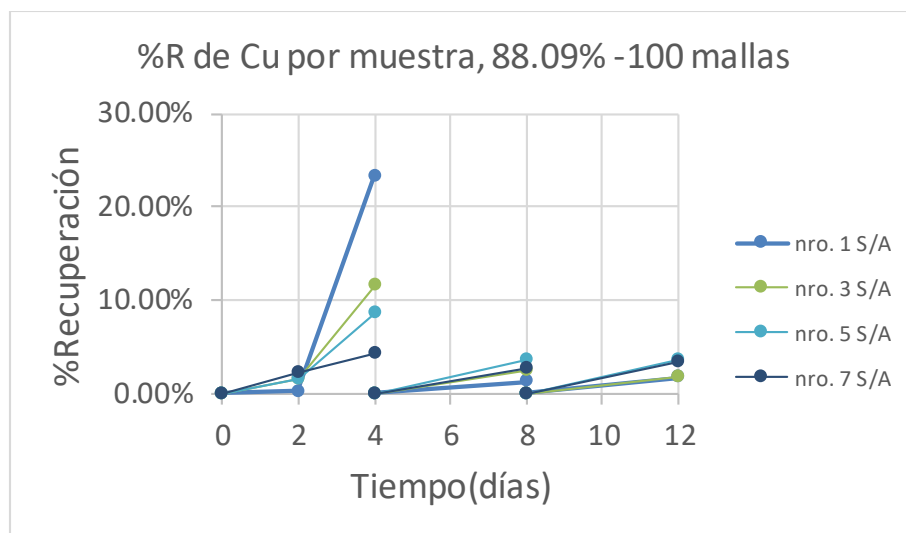


Figura N° 10. Porcentaje de la recuperación de cobres sin aireación en solución por etapa de cada muestra en la 88.09% -100 mallas.

Fuente: Elaborado usando Excel 2013

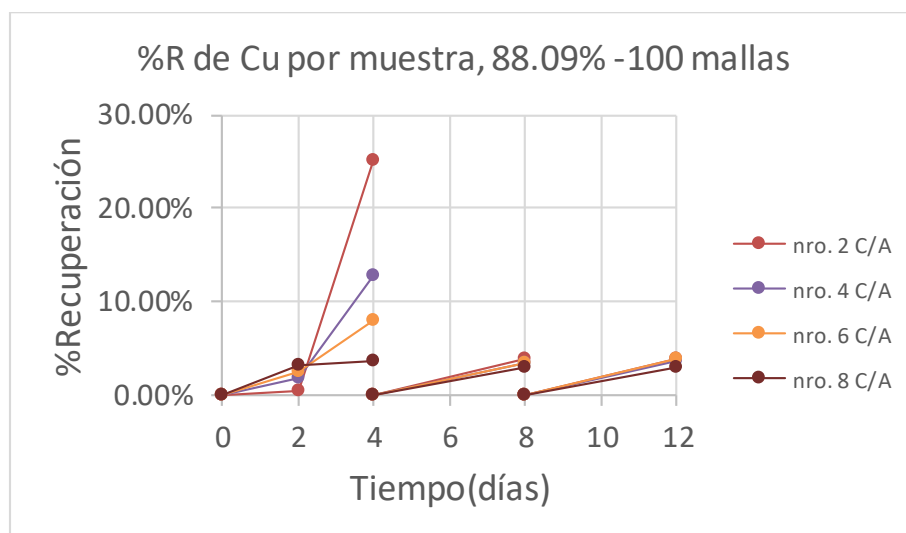


Figura N° 11. Porcentaje de la recuperación de cobre con aireación en solución por etapa de cada muestra en la 88.09% -100 mallas.

Tabla 17

Tabla de datos del %R Zn en solución de la 88.09% -100 mallas por etapa

		Aireación	1° Etapa	2° Etapa	3° Etapa	Acumulado
88.09% -100 mallas	1	No	36.24%	3.12%	1.14%	40.51%
	2	Sí	37.88%	6.90%	2.67%	47.45%
	3	No	18.00%	4.19%	0.95%	23.14%
	4	Sí	20.70%	4.36%	4.02%	29.08%
	5	No	14.77%	6.08%	6.34%	27.19%
	6	Sí	16.28%	5.41%	6.21%	27.90%
	7	No	8.89%	3.78%	4.36%	17.04%
	8	Sí	10.11%	5.14%	4.98%	20.23%

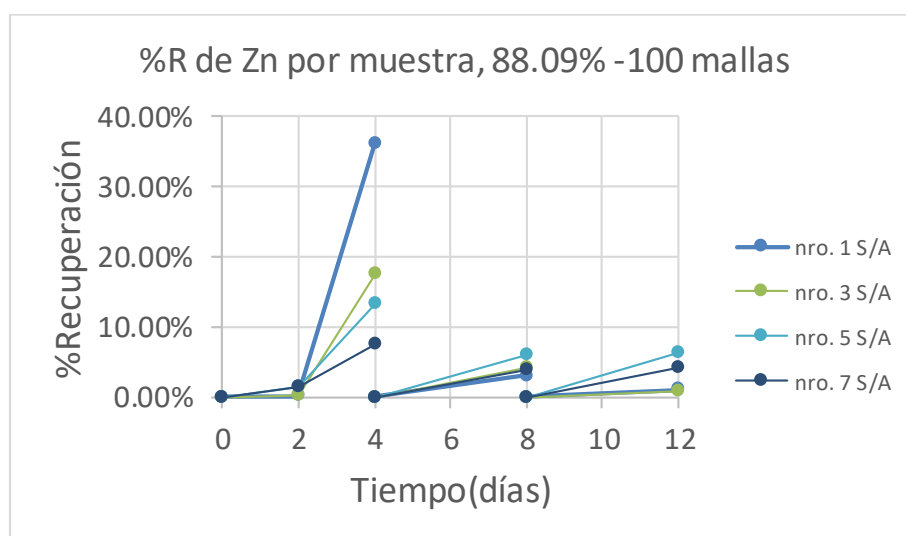


Figura N° 12. Porcentaje de la recuperación de zinc sin aireación en solución por etapa de cada muestra en la 88.09% -100 mallas.

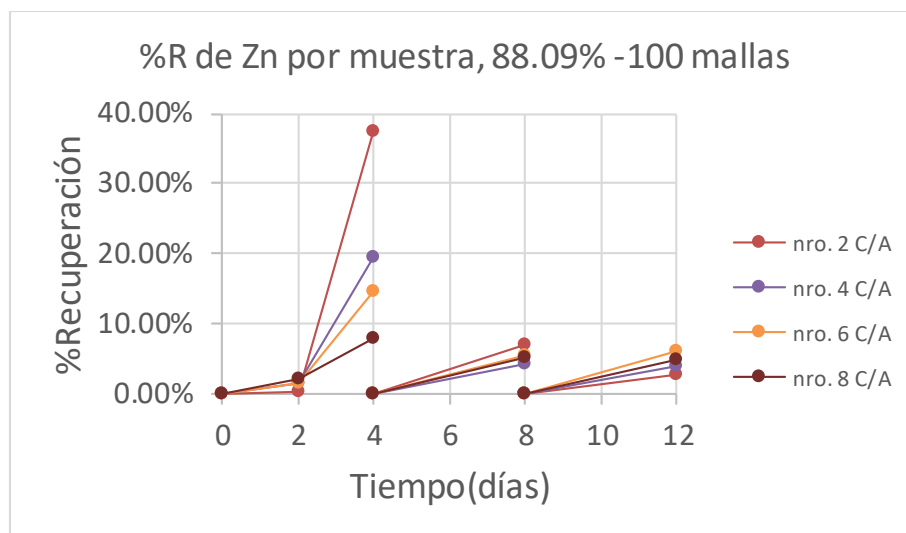


Figura N° 13. Porcentaje de la recuperación de zinc con aireación en solución por etapa de cada muestra en la 88.09% -100 mallas.

Tabla 18

Tabla de datos del %R Fe en solución de la 88.09% -100 mallas por etapa

		Aireación	1° Etapa	2° Etapa	3° Etapa	Acumulado
88.09% -100 mallas	1	No	2.65%	0.17%	0.57%	3.39%
	2	Sí	7.91%	4.78%	3.75%	16.44%
	3	No	1.37%	2.14%	0.26%	3.78%
	4	Sí	3.94%	10.48%	4.17%	18.59%
	5	No	1.14%	4.38%	2.53%	8.06%
	6	Sí	1.81%	7.69%	5.27%	14.77%
	7	No	0.83%	2.77%	2.49%	6.09%
	8	Sí	3.11%	4.89%	4.37%	12.37%

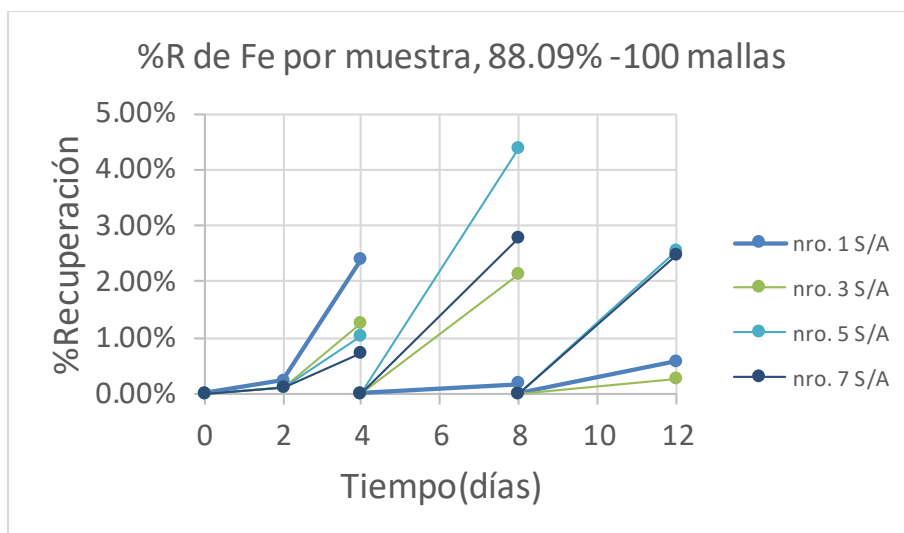


Figura N° 14. Porcentaje de la recuperación de fierro sin aireación en solución por etapa de cada muestra en la 88.09% -100 mallas.

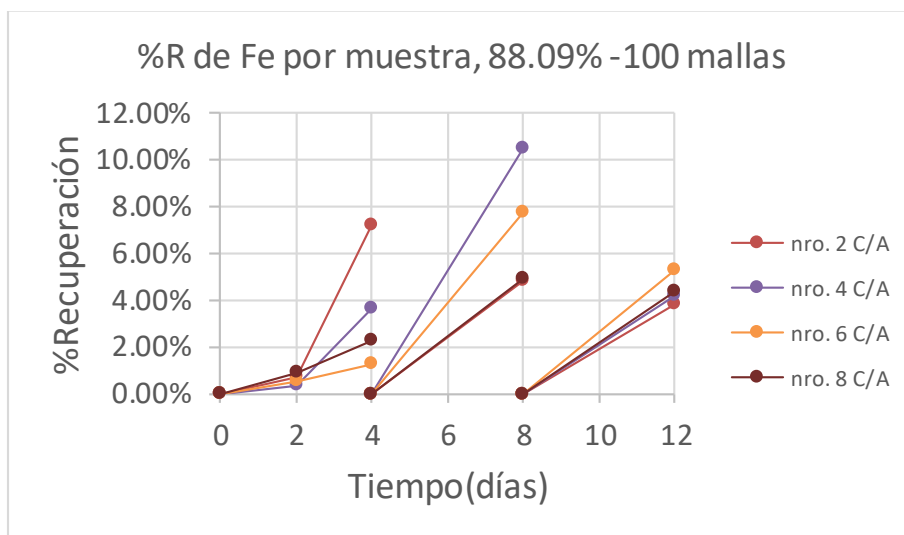


Figura N° 15. Porcentaje de la recuperación de fierro con aireación en solución por etapa de cada muestra en la 88.09% -100 mallas.

Tabla 19

Tabla de datos del %R As en solución de la 88.09% -100 mallas por etapa

		Aireación	1° Etapa	2° Etapa	3° Etapa	Acumulado
88.09% -100 mallas	1	No	2.83%	1.03%	2.13%	5.99%
	2	Sí	6.41%	2.41%	6.01%	14.83%
	3	No	2.11%	1.37%	1.57%	5.06%
	4	Sí	11.22%	8.65%	5.03%	24.91%
	5	No	6.01%	9.43%	7.55%	22.98%
	6	Sí	10.18%	9.33%	7.92%	27.42%
	7	No	4.71%	4.50%	4.03%	13.24%
	8	Sí	6.77%	6.14%	5.47%	18.38%

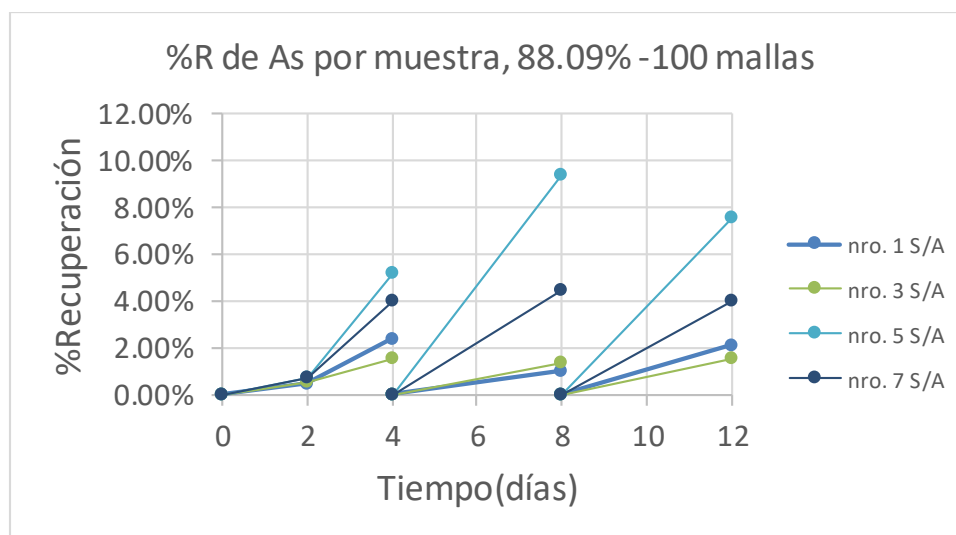


Figura N° 16. Porcentaje de la recuperación de arsénico sin aireación en solución por etapa de cada muestra en la 88.09% -100 mallas.

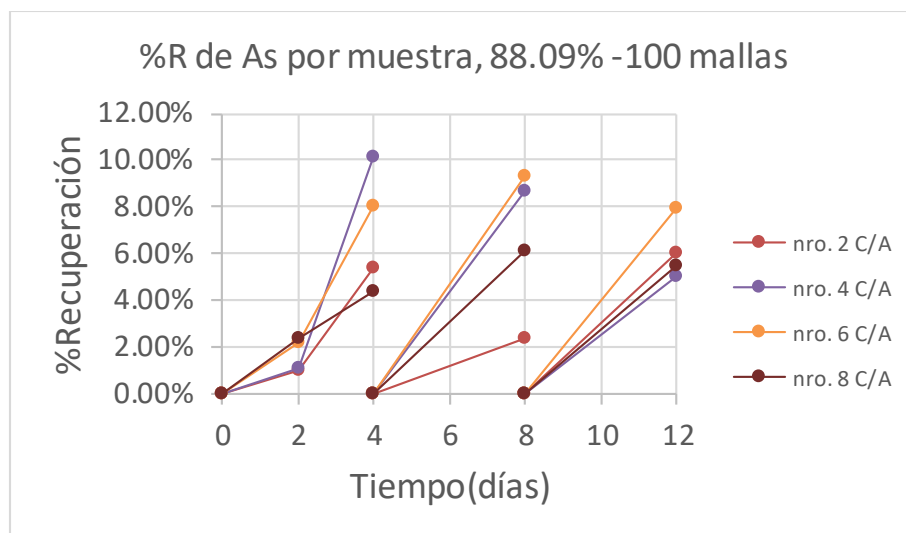


Figura N° 17. Porcentaje de la recuperación de arsénico con aireación en solución por etapa de cada muestra en la 88.09% -100 mallas.

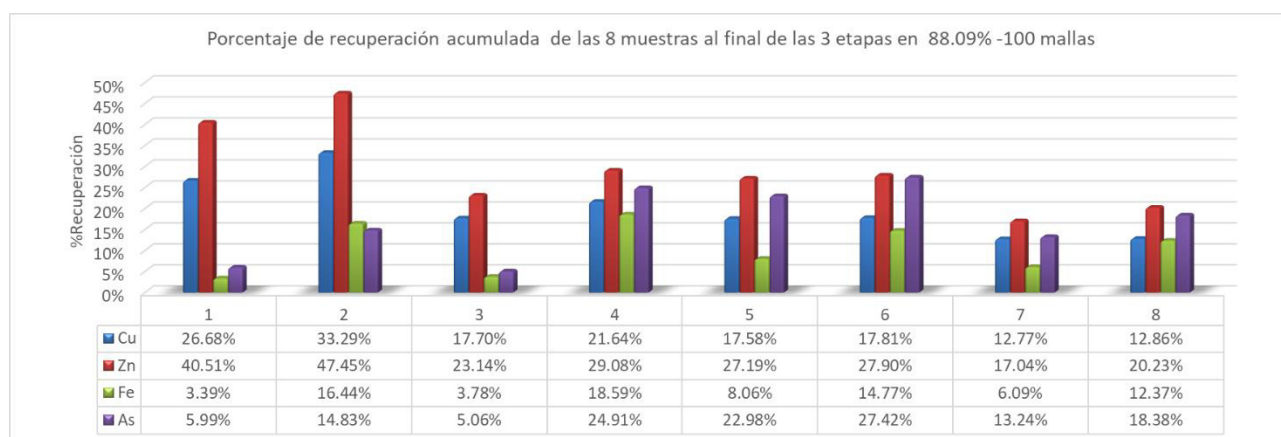


Figura N° 18. Representación gráfica del resumen de la recuperación de los metales de interés (Cu, Zn, Fe y As) en solución al término de las pruebas de biolixiviación en 88.09% -100 mallas.

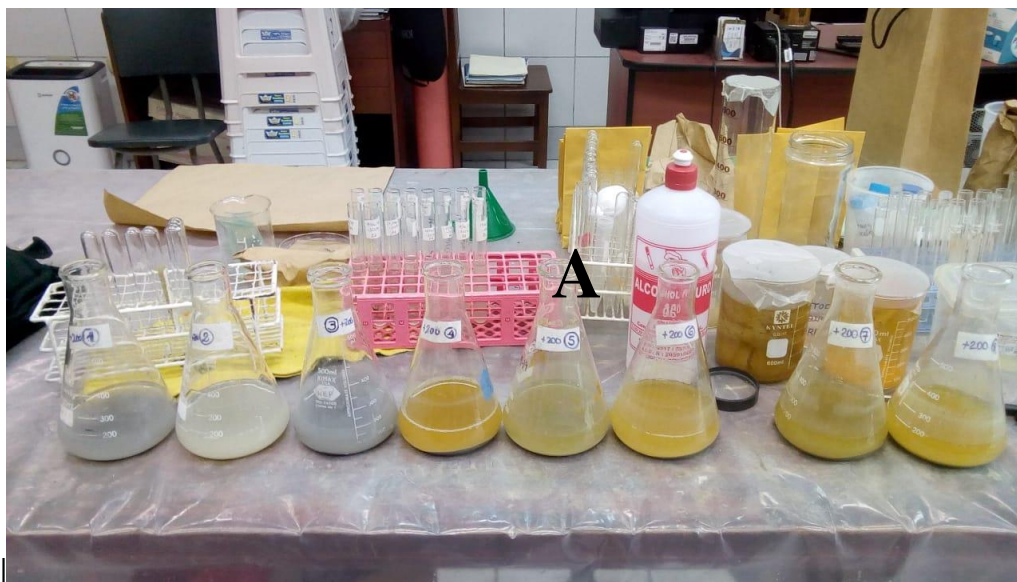


Figura N° 19. Concentración de los metales de interés en solución al término de la primera etapa en 88.09% -100 mallas.

Se puede apreciar cualitativamente la presencia de Fe^{3+} (coloración amarillenta como en el matraz “A”) en solución, siendo un incremento en la concentración izquierda a derecha en los matraces.

Fuente: Imagen tomada en el laboratorio de Biometalurgia

4.1.1.2. Control del Crecimiento de la Población Bacteriana en los Días Durante las Etapas de Biolixiviación en 88.09%-100 mallas.

Resumen del comportamiento de la población bacteriana en el tiempo durante la primera etapa de la prueba de biolixiviación en 88.09% -100 mallas.

Tabla 20

Conteo de la población bacteriana en células/mL de la primera etapa en 88.09% -100 mallas

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	3.34E+07	3.33E+07	2.40E+07	7.25E+07	8.50E+07
2	Sí	3.34E+07	2.95E+07	2.10E+07	5.88E+07	6.58E+07
3	No	3.34E+07	2.65E+07	1.93E+07	6.50E+07	7.00E+07
4	Sí	3.34E+07	2.03E+07	1.48E+07	6.13E+07	6.75E+07
5	No	3.34E+07	2.00E+07	2.05E+07	5.88E+07	6.25E+07
6	Sí	3.34E+07	1.88E+07	1.20E+07	7.50E+07	7.88E+07
7	No	3.04E+07	1.93E+07	1.68E+07	7.38E+07	1.44E+08
8	Sí	3.04E+07	1.60E+07	2.88E+07	7.63E+07	1.43E+08

Nota: Cuantificadas en células/mL a 1000 aumentos en el microscopio óptico del laboratorio de Biometalurgia, EP de Ingeniería Metalúrgica, UNMSM.

Resumen del comportamiento de la población bacteriana en el tiempo durante la segunda etapa de la prueba de biolixiviación en 88.09% -100 mallas.

Tabla 21

Conteo de la población bacteriana en células/mL de la segunda etapa en 88.09% -100 mallas

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	1.21E+07	1.23E+07	3.05E+07	3.38E+07	2.13E+07
2	Sí	9.34E+06	1.10E+07	2.65E+07	3.38E+07	1.58E+07
3	No	1.04E+07	1.55E+07	2.25E+07	2.10E+07	1.75E+07
4	Sí	1.01E+07	3.33E+07	1.19E+08	1.17E+08	6.63E+07
5	No	9.73E+06	2.60E+07	9.25E+07	1.00E+08	8.85E+07
6	Sí	1.23E+07	2.30E+07	1.29E+08	1.21E+08	6.88E+07
7	No	2.52E+07	4.08E+07	1.13E+08	1.16E+08	1.04E+08
8	Sí	2.50E+07	4.60E+07	1.33E+08	1.33E+08	8.75E+07

Nota: Cuantificadas en células/mL a 1000 aumentos en el microscopio óptico del laboratorio de Biometalurgia, EP de Ingeniería Metalúrgica, UNMSM.

Resumen del comportamiento de la población bacteriana en el tiempo durante la tercera etapa de la prueba de biolixiviación en 88.09% -100 mallas.

Tabla 22

Conteo de la población bacteriana en células/mL de la tercera etapa en 88.09% -100 mallas

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	6.76E+05	5.59E+06	1.05E+07	4.50E+06	8.10E+06
2	Sí	5.49E+05	5.90E+06	1.13E+07	1.08E+07	1.94E+07
3	No	1.18E+06	3.96E+06	6.75E+06	1.43E+07	2.57E+07
4	Sí	2.82E+06	9.78E+06	2.28E+07	6.75E+07	1.22E+08
5	No	6.39E+06	3.27E+07	4.27E+07	5.00E+07	9.00E+07
6	Sí	2.95E+06	2.50E+07	4.70E+07	7.88E+07	1.42E+08
7	No	7.49E+06	2.61E+07	4.48E+07	6.50E+07	1.17E+08
8	Sí	5.04E+06	2.75E+07	5.00E+07	6.00E+07	1.08E+08

Nota: Cuantificadas en células/mL a 1000 aumentos en el microscopio óptico del laboratorio de Biometalurgia, EP de Ingeniería Metalúrgica, UNMSM.

Resumen del comportamiento en el crecimiento bacteriano en el tiempo durante las tres etapas de la prueba de biolixiviación en 88.09% -100 mallas.

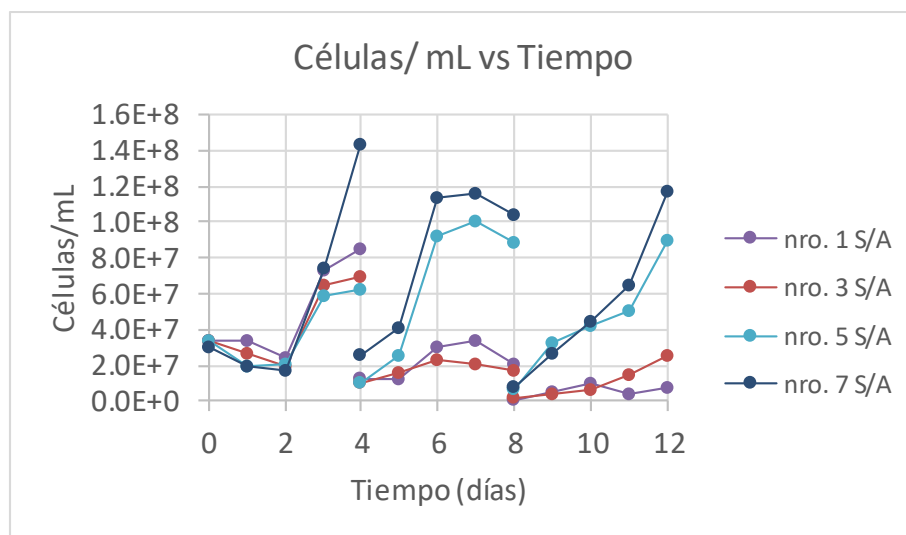


Figura N° 20. Comportamiento del crecimiento bacteriano en las muestras sin aireación en 88.09% -100 mallas, durante el tiempo en las tres etapas de la prueba de biolixiviación.

Al término de cada etapa, se cambió la solución en cada muestra (PLS) presente en los matraces por el medio líquido 9K (sin sulfato ferroso).

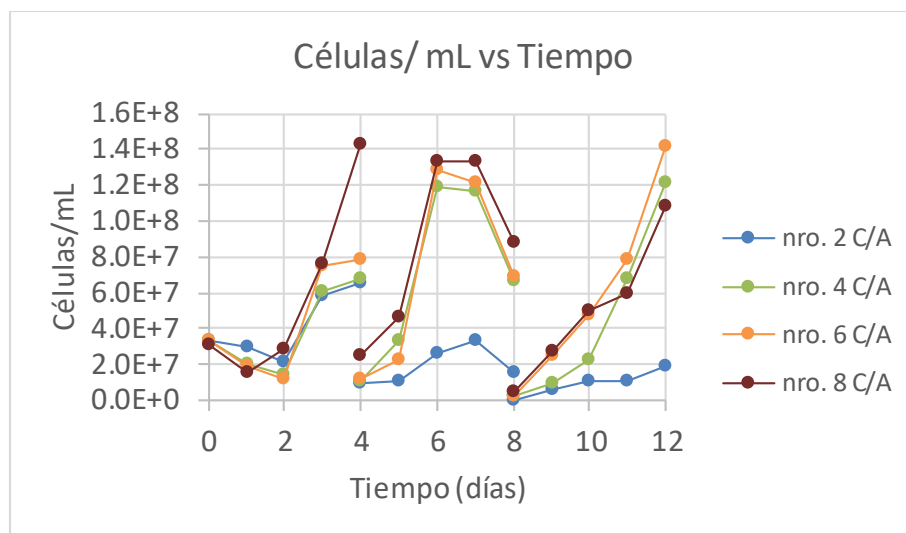


Figura N° 21. Comportamiento del crecimiento bacteriano en las muestras con aireación en 88.09% -100 mallas, durante el tiempo en las tres etapas de la prueba de biolixiviación.

Al término de cada etapa, se cambió la solución en cada muestra (PLS) presente en los matraces por el medio líquido 9K (sin sulfato ferroso).



Figura N° 22. Fotografía de *Thiobacillus ferrooxidans* (dentro de los círculos rojos) vista a 1,000 aumentos en la cámara de Neubauer en el microscopio óptico al finalizar la tercera y última etapa de biolixiviación en 88.09% -100 mallas.

Fuente: Imagen tomada en el laboratorio de Biometalurgia

4.1.1.3. Respuesta del Potencial Óxido Reducción en los Días Durante las Etapas de Biolixiviación en 88.09%-100 mallas.

Resumen del Potencial Óxido Reducción en el tiempo durante la primera etapa de la prueba de biolixiviación en 88.09% -100 mallas.

Tabla 23

Medición del Potencial Óxido Reducción en mV de la primera etapa en 88.09% -100 mallas

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	540	534	498	478	502
2	Sí	550	551	557	583	613
3	No	549	538	531	522	535
4	Sí	549	557	590	610	619
5	No	550	557	551	579	610
6	Sí	550	559	580	599	620
7	No	552	561	575	598	615
8	Sí	547	602	613	613	616

Resumen del Potencial Óxido Reducción en el tiempo durante la segunda etapa de la prueba de biolixiviación en 88.09% -100 mallas.

Tabla 24

Medición del Potencial Óxido Reducción en mV de la segunda etapa en 88.09% -100 mallas

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	437	464	479	517	518
2	Sí	488	506	543	559	577
3	No	506	518	535	543	549
4	Sí	559	598	626	628	632
5	No	558	599	616	620	630
6	Sí	581	608	625	625	635
7	No	577	611	624	628	629
8	Sí	498	613	613	623	623

Resumen del Potencial Óxido Reducción en el tiempo durante la tercera etapa de la prueba de biolixiviación en 88.09% -100 mallas.

Tabla 25

Medición del Potencial Óxido Reducción en mV de la tercera etapa en 88.09% -100 mallas

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	Sí	485	531	538	539	539
2	No	534	545	559	570	588
3	Sí	533	552	559	562	563
4	No	551	595	617	619	622
5	Sí	573	608	622	623	624
6	No	577	622	624	625	628
7	Sí	579	613	614	622	631
8	No	451	618	628	635	634

Resumen del Potencial Óxido Reducción en el tiempo durante las tres etapas de la prueba de biolixiviación en 88.09% -100 mallas.

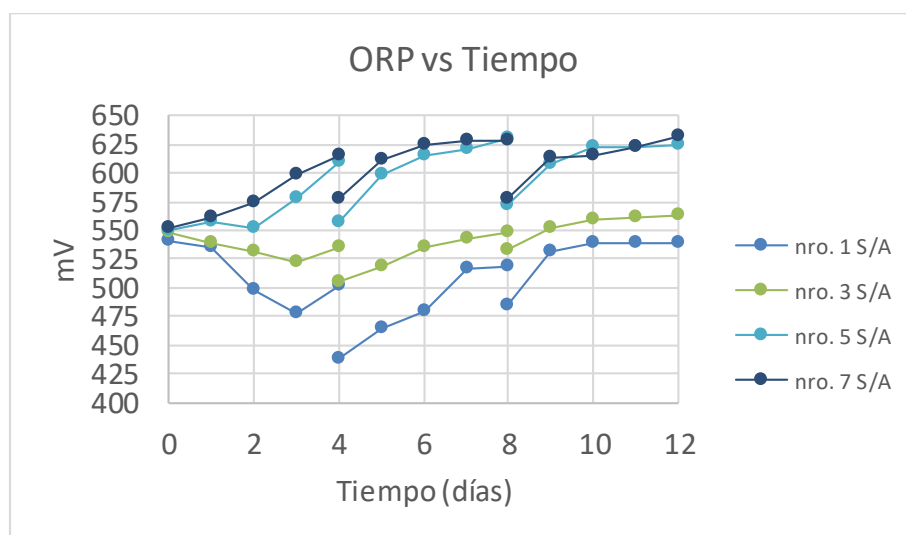


Figura N° 23. Respuesta del Óxido Potencial Reducción de las muestras sin aireación en 88.09% -100 mallas, durante el tiempo en las tres etapas de la prueba de biolixiviación. Al término de cada etapa, se cambió la solución en cada muestra (PLS) presente en los matraces por el medio líquido 9K (sin sulfato ferroso).

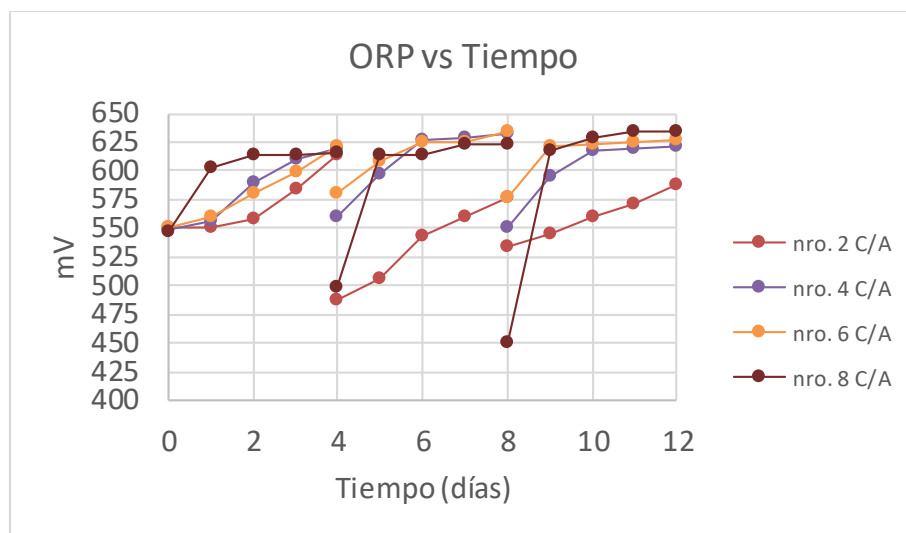


Figura N° 24. Respuesta del Óxido Potencial Reducción de las muestras con aireación en 88.09% -100 mallas, durante el tiempo en las tres etapas de la prueba de biolixiviación.

Al término de cada etapa, se cambió la solución en cada muestra (PLS) presente en los matraces por el medio líquido 9K (sin sulfato ferroso).

4.1.1.4. Respuesta del Oxígeno Disuelto en los Días Durante las Etapas de Biolixiviación en 88.09%-100 mallas.

Resumen de la respuesta del oxígeno disuelto en solución (DO) cuantificada en partes por millón (ppm) en el tiempo durante la primera etapa de la prueba de biolixiviación en 88.09% - 100 mallas.

Tabla 26

Oxígeno disuelto en ppm en el tiempo durante la primera etapa

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	3.72	4.17	4.17	4.16	4.02
2	Sí	3.63	3.98	4.26	3.79	3.02
3	No	3.58	4.06	4.00	4.00	4.00
4	Sí	3.62	3.59	3.27	2.65	2.26
5	No	3.43	3.31	3.17	3.00	1.59
6	Sí	3.36	3.31	2.00	1.96	1.81
7	No	3.45	3.28	1.68	1.29	1.09
8	Sí	3.34	2.28	0.79	0.93	1.43

Resumen de la respuesta del oxígeno disuelto en solución (DO) cuantificada en partes por millón (ppm) en el tiempo durante la segunda etapa de la prueba de biolixiviación en 88.09% - 100 mallas.

Tabla 27

Respuesta del oxígeno disuelto en ppm en el tiempo durante la segunda etapa

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	3.93	3.90	3.84	3.96	4.06
2	Sí	3.89	3.96	3.70	3.79	3.85
3	No	3.75	3.81	3.85	3.90	4.15
4	Sí	3.18	3.43	3.08	2.92	2.55
5	No	2.54	3.33	3.53	2.69	2.56
6	Sí	3.24	2.91	1.72	1.69	1.53
7	No	0.81	2.41	2.47	1.98	1.09
8	No	0.78	0.78	0.78	0.90	1.54

Resumen de la respuesta del oxígeno disuelto en solución (DO) cuantificada en partes por millón (ppm) en el tiempo durante la tercera etapa de la prueba de biolixiviación en 88.09% -100 mallas.

Tabla 28

Respuesta del oxígeno disuelto en ppm en el tiempo durante la tercera etapa

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	4.63	4.29	4.16	4.31	4.25
2	Sí	4.56	3.97	3.77	3.84	3.05
3	No	4.35	4.30	3.88	3.84	3.49
4	Sí	4.42	4.02	3.39	3.42	2.83
5	No	3.93	3.72	2.98	2.79	2.45
6	Sí	4.07	3.17	2.68	2.88	4.65
7	No	3.27	3.40	2.74	2.71	2.68
8	Sí	2.03	2.22	1.51	1.88	2.94

Resumen de la respuesta del oxígeno disuelto en solución (DO) cuantificada en partes por millón (ppm) en el tiempo durante las tres etapas de la prueba de biolixiviación en 88.09% -100 mallas.

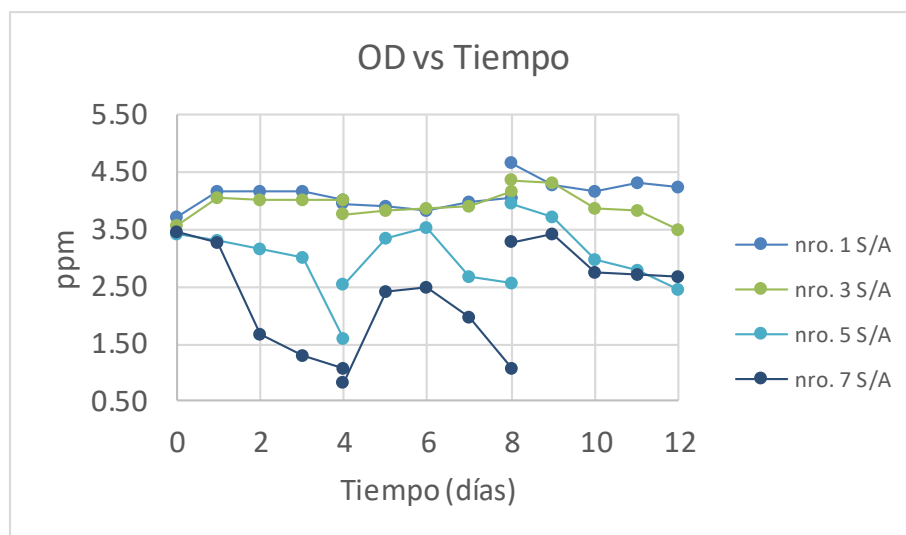


Figura N° 25. Oxígeno en solución de todas las muestras en las tres etapas.

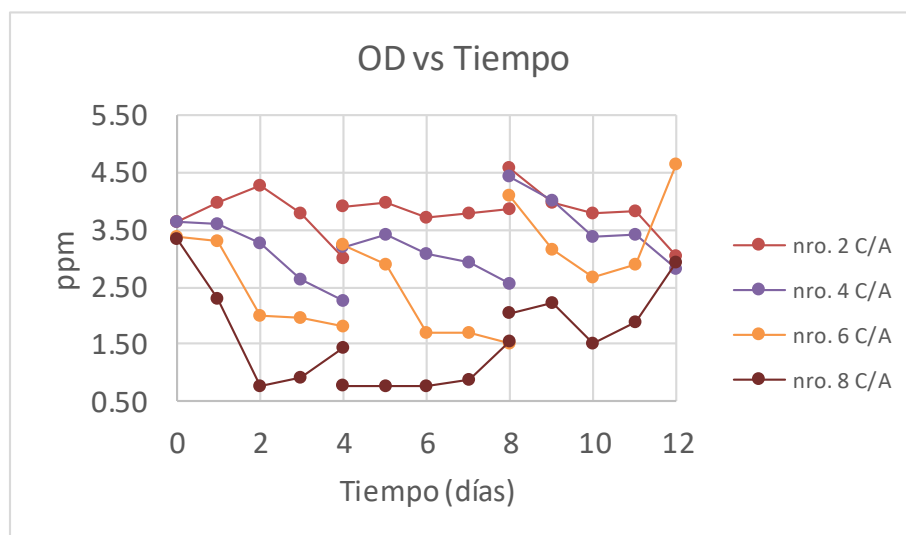


Figura N° 26. Oxígeno en solución de todas las muestras en las tres etapas.

4.1.2. Estudio de la Muestra a Tratar con Granulometría 65.23% -200 mallas.

4.1.2.1. Recuperación de los Metales de Interés en 65.23%-200 mallas.

Comparación entre la recuperación de los metales en solución durante el tratamiento de biolixiviación de las 8 muestras y en 65.23% -200 mallas a las condiciones establecidas mostradas en la [Tabla 13](#) durante las 3 etapas.

Para determinar la concentración en solución al fin de cada etapa se usó las lámparas de Cu, Zn, Fe y As del equipo de espectrofotometría de absorción atómica perteneciente al laboratorio de Análisis Químico de la EP de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Tabla 29

Tabla de datos del %R Cu en solución de la 65.23% -200 mallas por etapa

		Aireación	1° Etapa	2° Etapa	3° Etapa	Acumulado
65.23% -200 mallas	1	No	3.36%	1.05%	0.20%	4.62%
	2	Sí	6.24%	2.17%	0.26%	8.67%
	3	No	4.74%	4.47%	0.10%	9.31%
	4	Sí	5.24%	3.26%	1.74%	10.23%
	5	No	5.91%	4.61%	1.11%	11.64%
	6	Sí	5.02%	3.82%	1.09%	9.93%
	7	No	3.87%	3.69%	1.29%	8.85%
	8	Sí	3.67%	2.67%	0.91%	7.25%

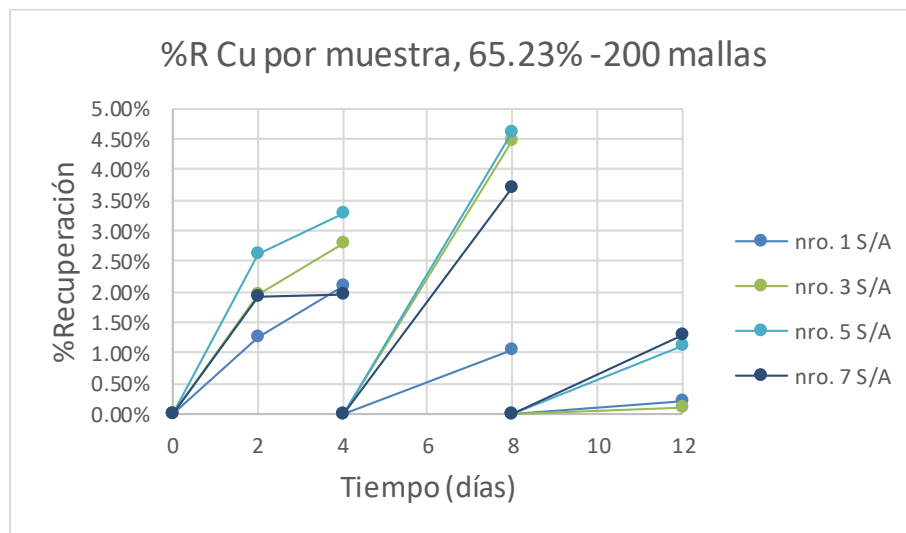


Figura N° 27. Recuperación de cobre sin aireación en solución por etapa de cada muestra en la 65.23% -200 mallas.

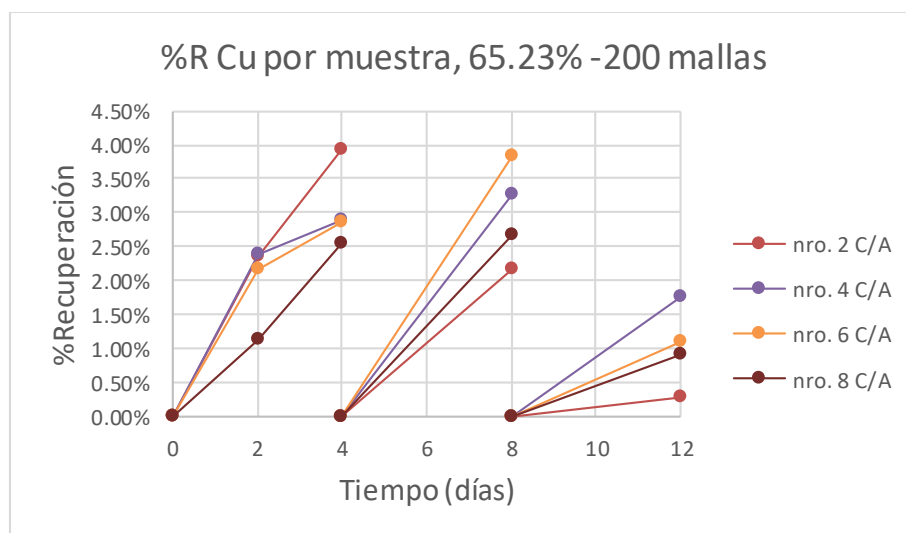


Figura N° 28. Recuperación de cobre con aireación en solución por etapa de cada muestra en la 65.23% -200 mallas.

Tabla 30

Tabla de datos del %R Zn en solución de la 65.23% -200 mallas por etapa

		Aireación	1° Etapa	2° Etapa	3° Etapa	Acumulado
65.23% -200 mallas	1	No	2.95%	0.85%	0.11%	3.91%
	2	Sí	5.12%	3.55%	0.80%	9.46%
	3	No	5.01%	1.86%	0.13%	6.99%
	4	Sí	6.14%	7.50%	2.42%	16.06%
	5	No	6.51%	10.37%	4.02%	20.89%
	6	Sí	7.67%	9.39%	4.32%	21.39%
	7	No	3.26%	5.92%	1.65%	10.84%
	8	Sí	4.55%	6.82%	3.34%	14.71%

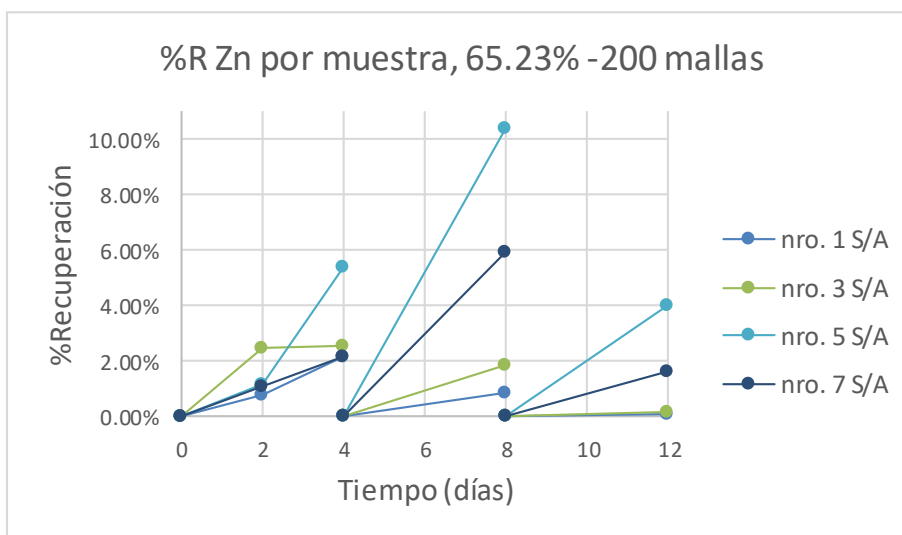


Figura N° 29. Recuperación de zinc sin aireación en solución por etapa de cada muestra en la 65.23% -200 mallas.

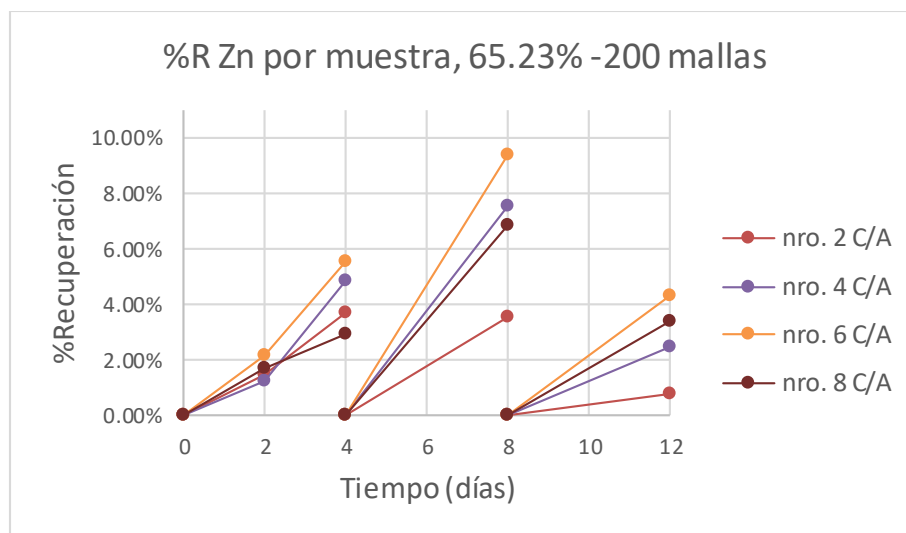


Figura N° 30. Recuperación de zinc con aireación en solución por etapa de cada muestra en la 65.23% -200 mallas.

Tabla 31

Tabla de datos del %R Fe en solución de la 65.23% -200 mallas por etapa

	Aireación	1° Etapa	2° Etapa	3° Etapa	Acumulado
65.23% -200 mallas	1 No	3.00%	0.02%	1.96%	4.98%
	2 Sí	4.68%	0.43%	2.88%	7.99%
	3 No	9.12%	0.49%	4.76%	14.36%
	4 Sí	10.13%	4.24%	4.85%	19.22%
	5 No	7.39%	14.06%	4.63%	26.09%
	6 Sí	6.97%	17.24%	4.93%	29.14%
	7 No	5.02%	2.36%	1.48%	8.86%
	8 Sí	3.52%	8.72%	2.49%	14.72%

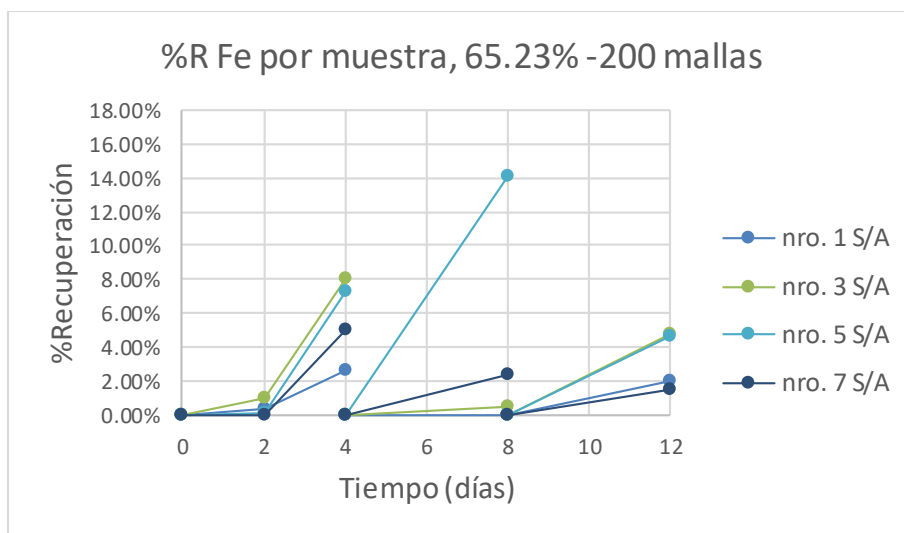


Figura N° 31. Recuperación de hierro sin aireación en solución por etapa de cada muestra en la 65.23% -200 mallas.

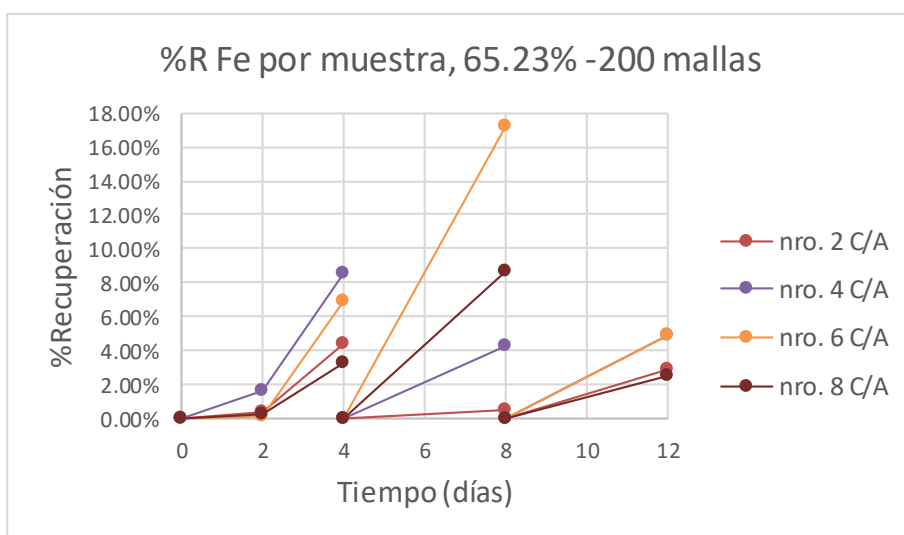


Figura N° 32. Recuperación de hierro con aireación en solución por etapa de cada muestra en la 65.23% -200 mallas.

Tabla 32

Tabla de datos del %R As en solución de la 65.23% -200 mallas por etapa

		Aireación	1° Etapa	2° Etapa	3° Etapa	Acumulado
65.23% -200 mallas	1	No	3.18%	1.35%	0.65%	5.18%
	2	Sí	4.09%	2.51%	0.96%	7.56%
	3	No	9.46%	4.28%	1.59%	15.34%
	4	Sí	9.66%	7.85%	3.42%	20.93%
	5	No	8.51%	11.77%	9.87%	30.15%
	6	Sí	8.35%	13.95%	10.54%	32.85%
	7	No	5.42%	2.46%	3.35%	11.22%
	8	Sí	5.92%	7.27%	6.10%	19.29%

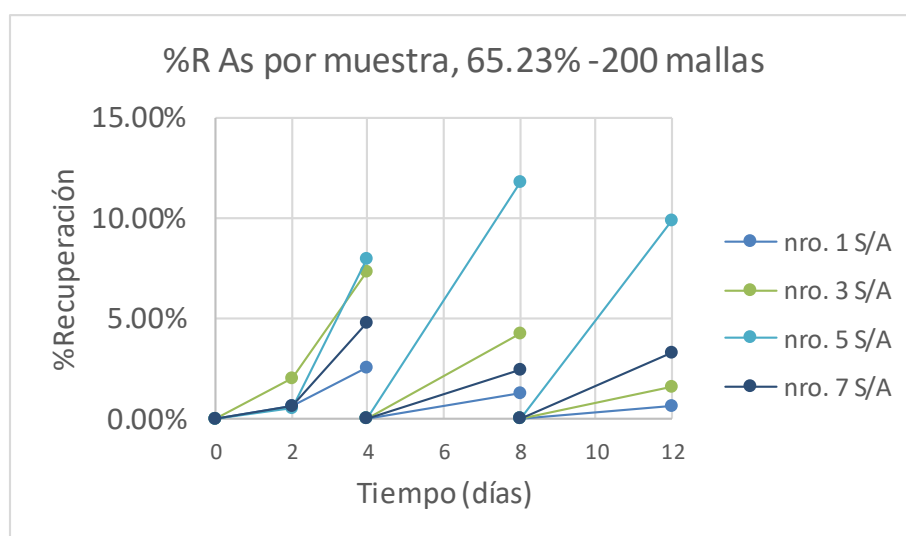


Figura N° 33. Recuperación de arsénico sin aireación en solución por etapa de cada muestra en la 65.23% -200 mallas.

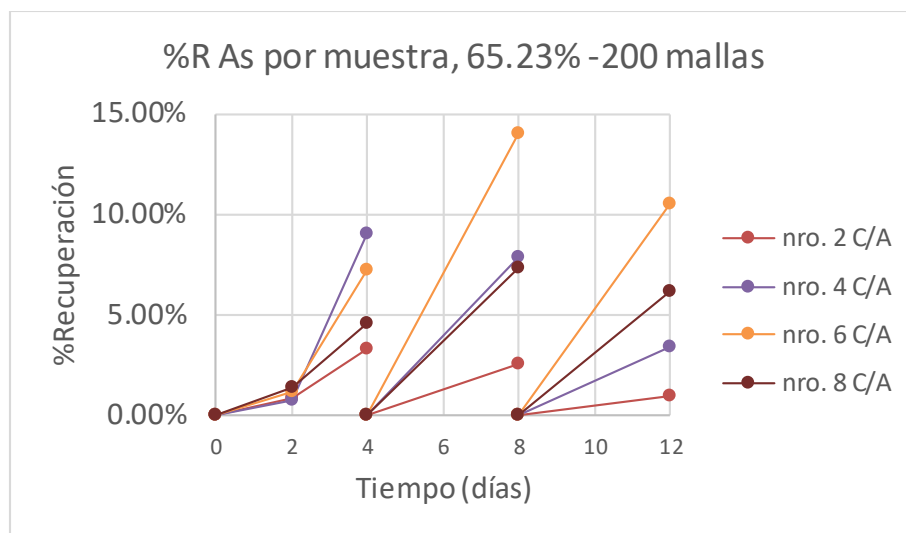


Figura N° 34. Recuperación de arsénico con aireación en solución por etapas de cada muestra en la 65.23% -200 mallas.

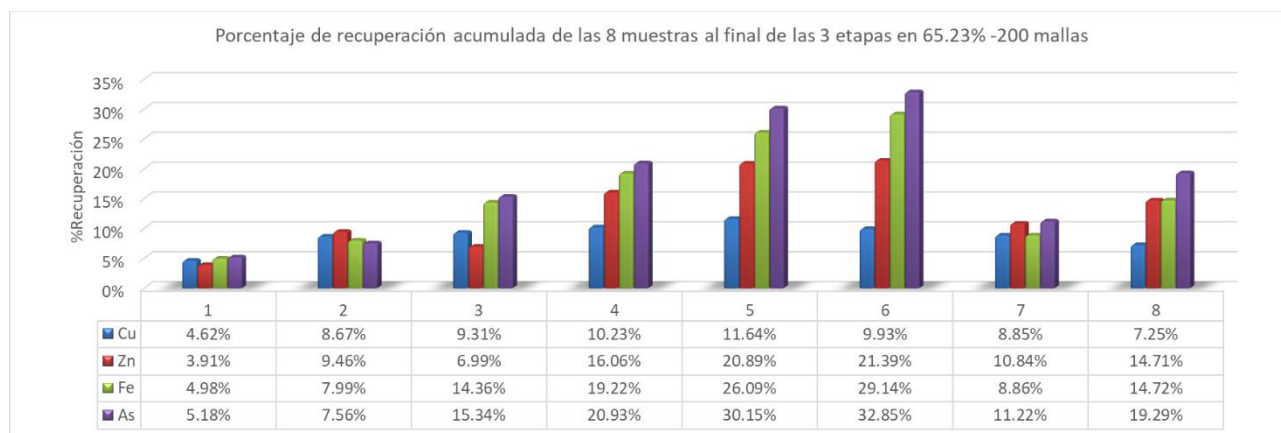


Figura N° 35. Representación gráfica del resumen de la recuperación de los metales de interés (Cu, Zn, Fe y As) en solución al término de las pruebas de biolixiviación en 65.23% -200 mallas.



Figura N° 36. Shaker con las muestras en la tercera etapa del pretratamiento en 65.23% -200 mallas. Se observan diferencias en el color de las muestras debido a la concentración de hierro en solución, siendo las de color gris las de menor recuperación en hierro.
Fuente: Imagen tomada en el laboratorio de Biometalurgia

4.1.2.2. Control del Crecimiento de la Población Bacteriana en los Días Durante las Etapas de Biolixiviación en 65.23%-200 mallas.

Resumen del comportamiento de la población bacteriana en el tiempo durante la primera etapa de la prueba de biolixiviación en 65.23% -200 mallas.

Tabla 33

Conteo de la población bacteriana en células/mL de la primera etapa en 65.23% -200 mallas

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	4.40E+07	9.00E+06	7.00E+06	5.00E+06	1.50E+07
2	Sí	4.40E+07	4.00E+06	6.63E+06	9.25E+06	2.78E+07
3	No	4.40E+07	2.75E+06	5.50E+06	8.25E+06	2.48E+07
4	Sí	4.40E+07	6.75E+06	1.06E+07	1.45E+07	1.13E+08
5	No	4.40E+07	7.50E+06	1.13E+07	1.50E+07	1.60E+08
6	Sí	4.40E+07	8.75E+06	2.54E+07	4.20E+07	1.15E+08
7	No	4.40E+07	9.75E+06	2.13E+07	3.28E+07	1.68E+08
8	Sí	4.40E+07	2.25E+06	3.60E+07	6.98E+07	1.23E+08

Nota: Cuantificadas en células/mL a 1000 aumentos en el microscopio óptico del laboratorio de Biometalurgia, EP de Ingeniería Metalúrgica, UNMSM.

Resumen del comportamiento de la población bacteriana en el tiempo durante la segunda etapa de la prueba de biolixiviación en 65.23% -200 mallas.

Tabla 34

Conteo de la población bacteriana en células/mL de la segunda etapa en 65.23% -200 mallas

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	2.10E+05	5.25E+06	5.50E+06	4.75E+06	4.00E+06
2	Sí	3.02E+05	7.00E+06	7.75E+06	8.38E+06	9.00E+06
3	No	2.97E+05	6.00E+06	1.40E+07	1.19E+07	9.75E+06
4	Sí	1.58E+06	1.88E+07	3.13E+07	5.50E+07	7.88E+07
5	No	2.52E+06	3.80E+07	4.88E+07	8.94E+07	1.30E+08
6	Sí	2.24E+06	3.15E+07	3.55E+07	7.86E+07	1.04E+08
7	No	1.59E+06	4.63E+07	7.25E+07	1.13E+08	1.53E+08
8	Sí	1.53E+06	3.85E+07	1.03E+08	1.09E+08	1.15E+08

Nota: Cuantificadas en células/mL a 1000 aumentos en el microscopio óptico del laboratorio de Biometalurgia, EP de Ingeniería Metalúrgica, UNMSM

Resumen del comportamiento de la población bacteriana en el tiempo durante la tercera etapa de la prueba de biolixiviación en 65.23% -200 mallas.

Tabla 35

Conteo de la población bacteriana en células/mL de la tercera etapa en 65.23% -200 mallas

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	5.45E+04	5.03E+06	1.00E+07	9.00E+06	8.78E+06
2	Sí	1.23E+05	4.81E+06	9.50E+06	2.34E+07	3.12E+07
3	No	2.09E+05	2.73E+06	5.25E+06	1.02E+07	1.02E+07
4	Sí	1.68E+06	9.59E+06	1.75E+07	4.65E+07	4.99E+07
5	No	3.81E+06	3.19E+07	6.00E+07	8.33E+07	9.98E+07
6	Sí	3.64E+06	2.74E+07	5.13E+07	7.85E+07	8.78E+07
7	No	7.88E+06	2.14E+07	3.50E+07	5.60E+07	6.71E+07
8	Sí	6.01E+06	4.49E+07	8.38E+07	1.15E+08	1.17E+08

Nota: Cuantificadas en células/mL a 1000 aumentos en el microscopio óptico del laboratorio de Biometalurgia, EP de Ingeniería Metalúrgica, UNMSM.

Resumen del comportamiento en el crecimiento bacteriano en el tiempo durante las tres etapas de la prueba de biolixiviación en 65.23% -200 mallas.

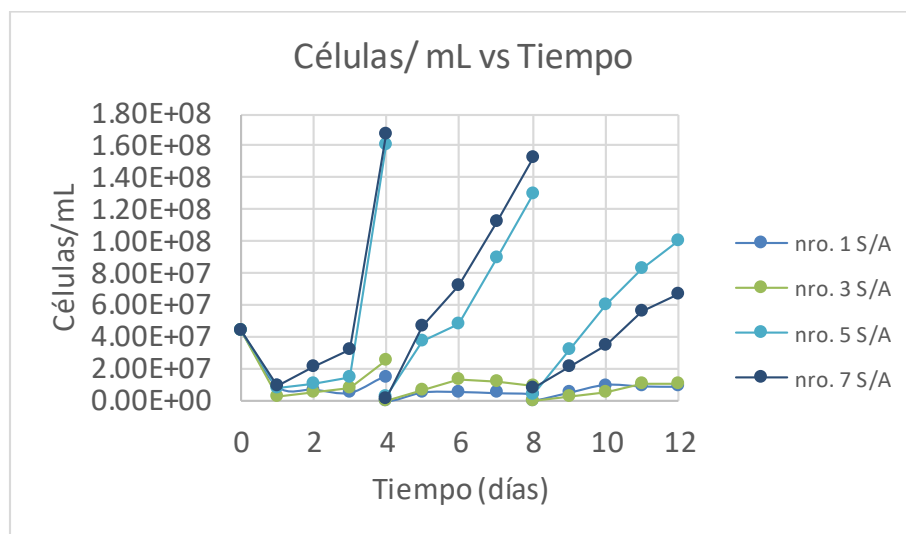


Figura N° 37. Comportamiento del crecimiento bacteriano en las muestras sin aireación en 65.23% -200 mallas, durante el tiempo en las tres etapas de la prueba de biolixiviación.

Al término de cada etapa, se cambió la solución en cada muestra (PLS) presente en los matraces por el medio líquido 9K (sin sulfato ferroso).

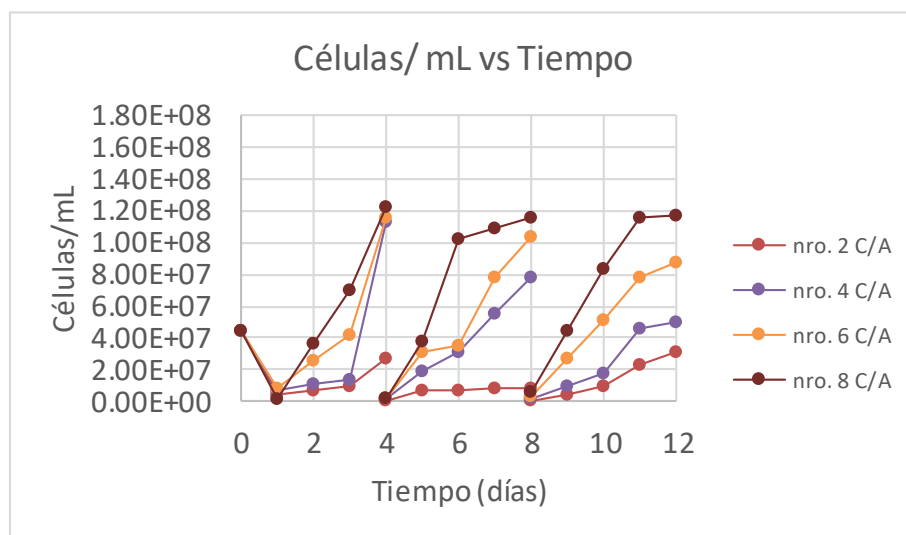


Figura N° 38. Comportamiento del crecimiento bacteriano en las muestras con aireación en 65.23% -200 mallas, durante el tiempo en las tres etapas de la prueba de biolixiviación.

Al término de cada etapa, se cambió la solución en cada muestra (PLS) presente en los matraces por el medio líquido 9K (sin sulfato ferroso).



Figura N° 39. Fotografía de *Thiobacillus ferrooxidans* (dentro de los círculos azules) vista a 1,000 aumentos en la cámara de Neubauer en el microscopio óptico al finalizar la tercera y última etapa de biolixiviación en 65.23% -200 mallas.

Fuente: Imagen tomada en el laboratorio de Biometalurgia

4.1.2.3. Respuesta del Potencial Óxido Reducción en los Días Durante las Etapas de Biolixiviación en 65.23%-200 mallas.

Resumen del Potencial Óxido Reducción en el tiempo durante la primera etapa de la prueba de biolixiviación en 65.23% -200 mallas.

Tabla 36

Medición del Potencial Óxido Reducción en mV de la primera etapa en 65.23% -200 mallas

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	538	528	520	501	525
2	Sí	513	544	547	555	558
3	No	535	522	545	550	558
4	Sí	545	551	553	598	604
5	No	544	553	586	594	614
6	Sí	546	551	604	611	610
7	No	541	556	583	593	605
8	Sí	543	570	573	578	581

Resumen del Potencial Óxido Reducción en el tiempo durante la segunda etapa de la prueba de biolixiviación en 65.23% -200 mallas.

Tabla 37

Medición del Potencial Óxido Reducción en mV de la segunda etapa en 65.23% -200 mallas

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	502	502	518	525	533
2	Sí	504	520	549	557	565
3	No	515	525	531	535	539
4	Sí	533	571	612	614	617
5	No	539	601	616	622	629
6	Sí	550	606	607	613	618
7	No	482	606	608	608	608
8	No	485	610	612	620	628

Resumen del Potencial Óxido Reducción en el tiempo durante la tercera etapa de la prueba de biolixiviación en 65.23% -200 mallas.

Tabla 38

Medición del Potencial Óxido Reducción en mV de la tercera etapa en 65.23% -200 mallas

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	503	501	528	529	530
2	Sí	528	538	540	541	541
3	No	525	527	535	536	536
4	Sí	577	596	608	611	612
5	No	600	619	620	621	622
6	Sí	600	617	619	620	621
7	No	598	616	614	615	616
8	No	602	622	622	622	623

Resumen del Potencial Óxido Reducción en el tiempo durante las tres etapas de la prueba de biolixiviación en 65.23% -200 mallas.

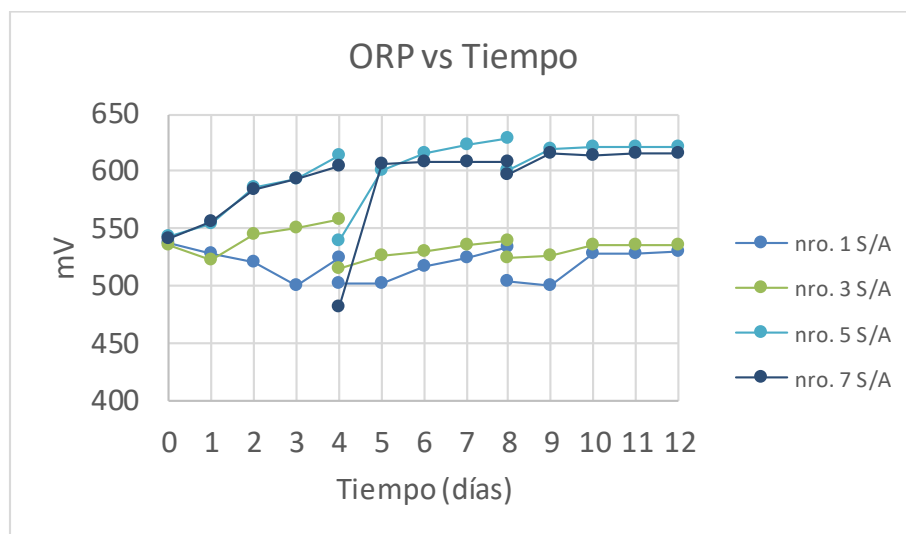


Figura N° 40. Respuesta del Óxido Potencial Reducción de las muestras sin aireación en 65.23% -200 mallas, durante el tiempo en las tres etapas de la prueba de biolixiviación.

Al término de cada etapa, se cambió la solución en cada muestra (PLS) presente en los matraces por el medio líquido 9K (sin sulfato ferroso).

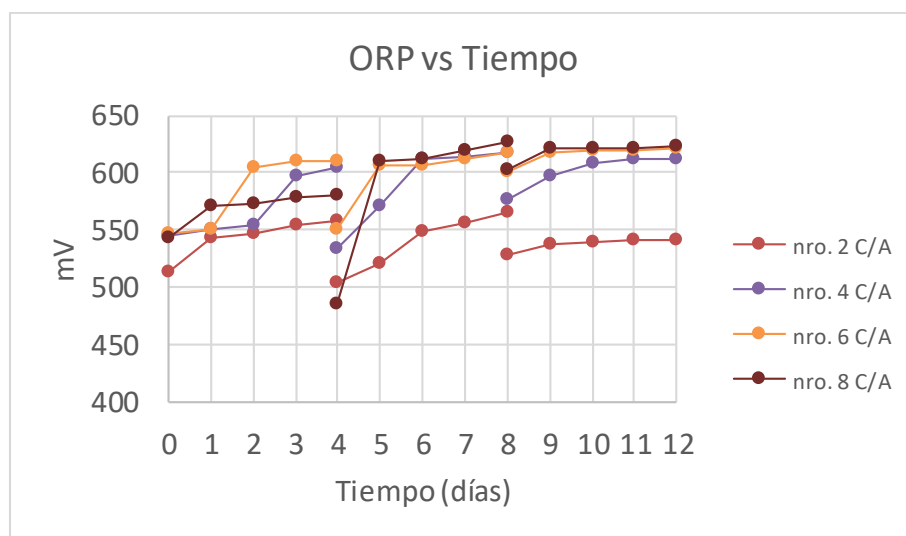


Figura N° 41. Respuesta del Óxido Potencial Reducción de las muestras con aireación en 65.23% -200 mallas, durante el tiempo en las tres etapas de la prueba de biolixiviación.

Al término de cada etapa, se cambió la solución en cada muestra (PLS) presente en los matraces por el medio líquido 9K (sin sulfato ferroso).

4.1.2.4. Respuesta del Oxígeno Disuelto en los Días Durante las Etapas de

Biolixiviación en 65.23%-200 mallas.

Resumen de la respuesta del oxígeno disuelto en solución (DO) cuantificada en partes por millón (ppm) en el tiempo durante la primera etapa de la prueba de biolixiviación en 65.23% - 200 mallas.

Tabla 39

Respuesta del oxígeno disuelto en ppm en el tiempo durante la primera etapa

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	3.39	4.73	4.62	4.53	4.48
2	Sí	3.28	4.22	4.15	4.40	4.31
3	No	3.09	3.95	3.98	3.42	3.61
4	Sí	3.17	3.79	3.85	3.21	1.09
5	No	3.06	3.80	3.79	1.50	2.61
6	Sí	3.16	3.44	2.26	1.46	2.74
7	No	2.98	3.59	3.48	0.59	1.62
8	Sí	2.89	2.94	0.86	1.97	1.45

Resumen de la respuesta del oxígeno disuelto en solución (DO) cuantificada en partes por millón (ppm) en el tiempo durante la segunda etapa de la prueba de biolixiviación en 65.23% - 200 mallas.

Tabla 40

Respuesta del oxígeno disuelto en ppm en el tiempo durante la segunda etapa

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	3.86	4.24	3.93	4.20	4.47
2	Sí	3.66	3.80	4.12	3.94	3.76
3	No	3.62	3.89	3.83	3.74	3.64
4	Sí	3.34	3.54	3.84	3.18	2.52
5	No	2.57	3.41	2.41	2.81	3.21
6	Sí	2.23	2.91	1.76	1.88	1.99
7	No	0.98	3.10	2.30	1.86	1.41
8	Sí	0.99	2.91	1.65	1.45	1.25

Resumen de la respuesta del oxígeno disuelto en solución (DO) cuantificada en partes por millón (ppm) en el tiempo durante la tercera etapa de la prueba de biolixiviación en 65.23% -200 mallas.

Tabla 41

Respuesta del oxígeno disuelto en ppm en el tiempo durante la tercera etapa

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	4.10	4.27	4.35	4.40	4.45
2	Sí	4.26	4.15	3.99	3.89	3.79
3	No	4.06	4.12	3.84	3.59	3.59
4	Sí	4.13	3.92	3.54	3.09	3.01
5	No	3.78	3.64	2.92	2.89	2.79
6	Sí	3.81	2.98	2.36	1.99	1.87
7	No	3.60	3.24	3.42	3.48	3.52
8	Sí	3.30	2.22	2.08	2.08	2.08

Resumen de la respuesta del oxígeno disuelto en solución (DO) cuantificada en partes por millón (ppm) en el tiempo durante las tres etapas de la prueba de biolixiviación en 65.23% -200 mallas.

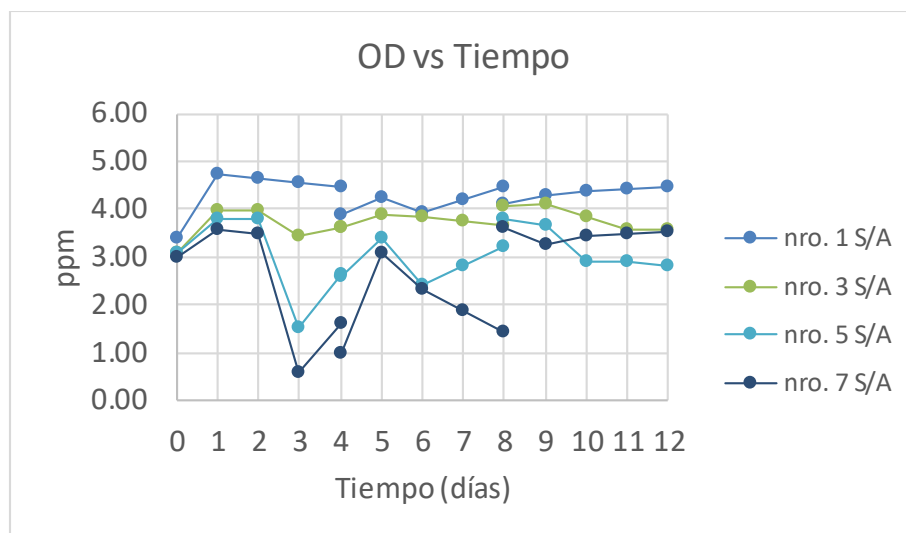


Figura N° 42. Respuesta del oxígeno en solución de todas las muestras sin aireación en 65.23% -200 mallas durante el tiempo en las tres etapas.

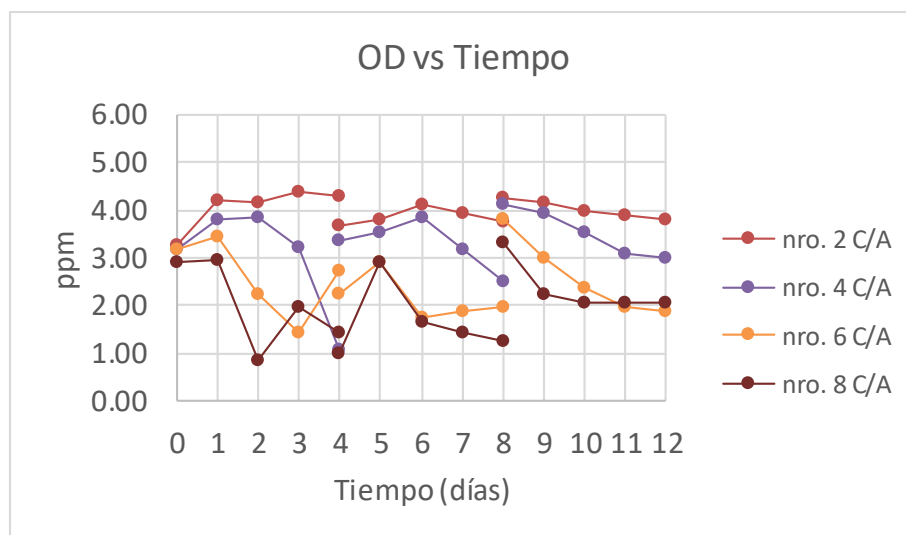


Figura N° 43. Respuesta del oxígeno en solución de todas las muestras con aireación en 65.23% -200 mallas durante el tiempo en las tres etapas.

4.1.3. Estudio de la muestra a Tratar con Granulometría 50.27% -325 mallas.

4.1.3.1. Recuperación de los Metales de Interés en 50.27%-325 mallas.

Comparación entre la recuperación de los metales en solución durante el tratamiento de biolixiviación de las 8 muestras y en 50.27% -325 mallas a las condiciones establecidas mostradas en la [Tabla 13](#) durante las 3 etapas.

Para determinar la concentración en solución al fin de cada etapa se usó las lámparas de Cu, Zn, Fe y As del equipo de espectrofotometría de absorción atómica perteneciente al laboratorio de Análisis Químico de la EP de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Tabla 42

Tabla de datos del %R Cu en solución de la 50.27% -325 mallas por etapa

		Aireación	1° Etapa	2° Etapa	3° Etapa	Acumulado
50.27% -325 mallas	1	No	22.75%	10.74%	7.42%	40.91%
	2	Sí	29.94%	23.74%	21.68%	75.36%
	3	No	19.26%	11.68%	9.13%	40.08%
	4	Sí	20.57%	18.66%	17.20%	56.44%
	5	No	16.19%	16.75%	12.90%	45.84%
	6	Sí	16.17%	18.59%	17.15%	51.92%
	7	No	12.58%	12.93%	10.60%	36.12%
	8	Sí	11.76%	11.06%	18.92%	41.74%

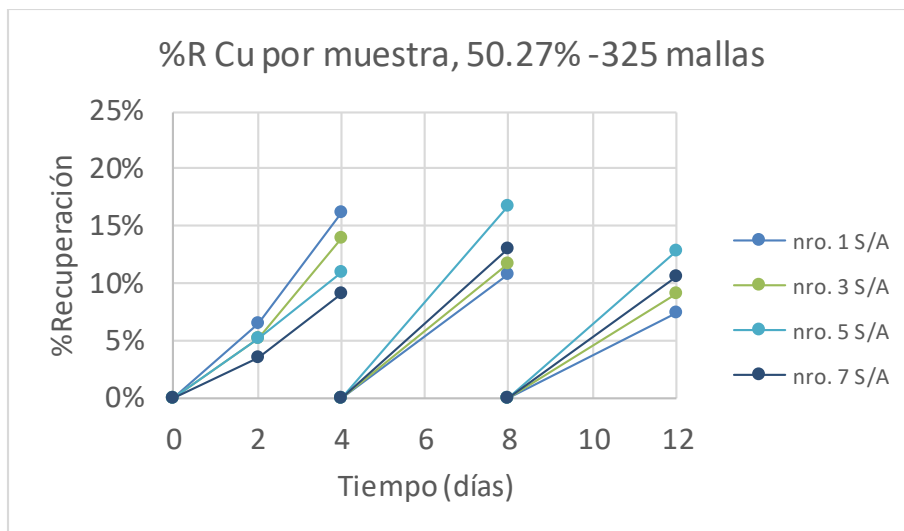


Figura N° 44. Recuperación de cobre sin aireación en solución por etapa de cada muestra en la 50.27% -325 mallas.

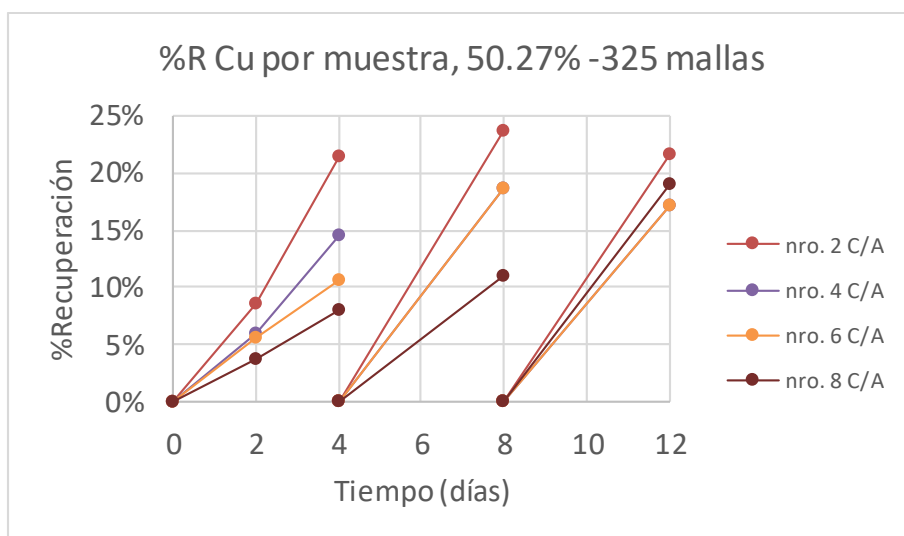


Figura N° 45. Recuperación de cobre con aireación en solución por etapa de cada muestra en la 50.27% -325 mallas.

Tabla 43

Tabla de datos del %R Zn en solución de la 50.27% -325 mallas por etapa

		Aireación	1° Etapa	2° Etapa	3° Etapa	Acumulado
50.27% -325 mallas	1	No	35.62%	17.50%	5.28%	58.39%
	2	Sí	39.00%	28.10%	13.85%	80.95%
	3	No	27.13%	15.89%	6.66%	49.68%
	4	Sí	27.78%	25.03%	12.04%	64.84%
	5	No	24.12%	23.89%	10.48%	58.49%
	6	Sí	22.21%	23.78%	14.05%	60.04%
	7	No	15.57%	22.33%	10.05%	47.95%
	8	Sí	13.12%	18.52%	20.28%	51.91%

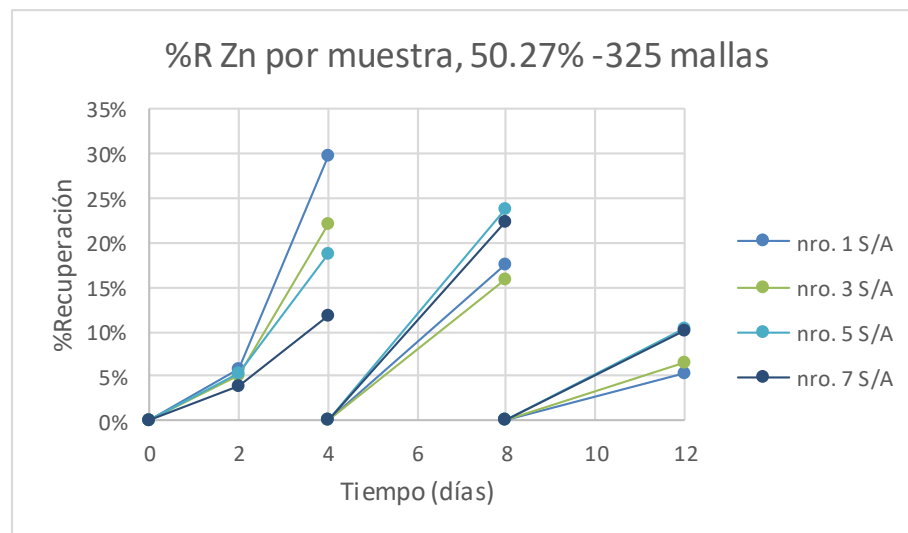


Figura N° 46. Recuperación de zinc sin aireación en solución por etapa de cada muestra en la 50.27% -325 mallas.

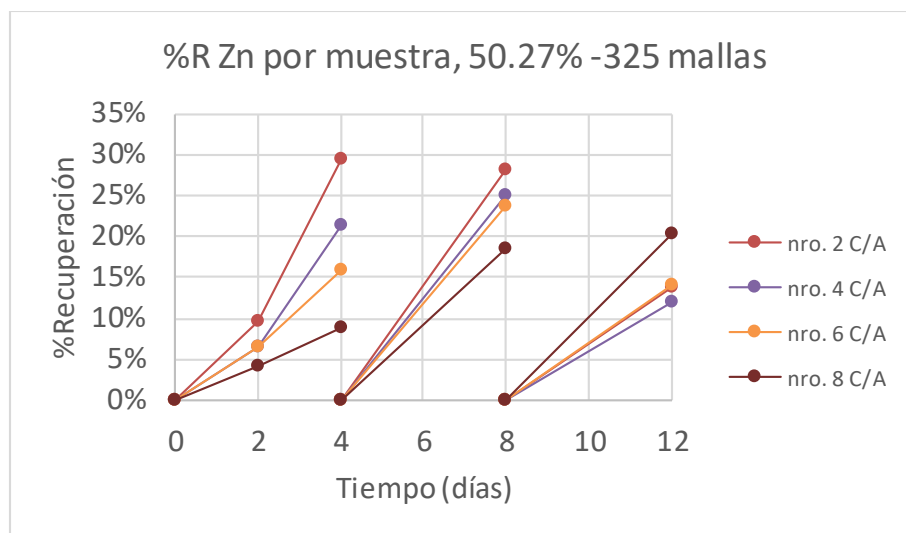


Figura N° 47. Recuperación de zinc con aireación en solución por etapa de cada muestra en la 50.27% -325 mallas.

Tabla 44

Tabla de datos del %R Fe en solución de la 50.27% -325 mallas por etapa

	Aireación	1° Etapa	2° Etapa	3° Etapa	Acumulado
50.27% -325 mallas	1 No	18.67%	4.84%	0.47%	23.98%
	2 Sí	28.52%	12.14%	3.70%	44.36%
	3 No	14.62%	4.41%	0.72%	19.74%
	4 Sí	16.38%	5.21%	6.96%	28.55%
	5 No	9.86%	5.10%	1.88%	16.84%
	6 Sí	8.36%	4.62%	6.52%	19.49%
	7 No	6.93%	3.78%	7.29%	18.00%
	8 Sí	6.01%	2.66%	4.81%	13.49%

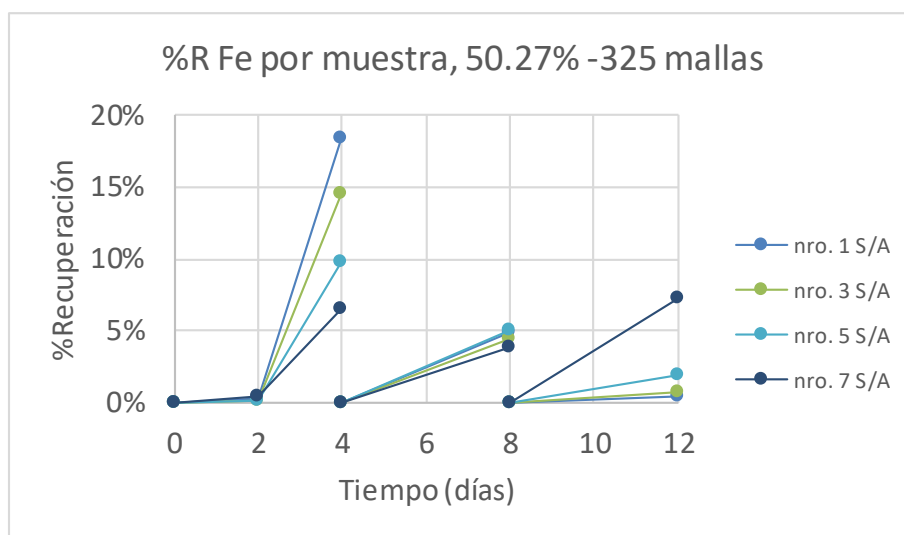


Figura N° 48. Recuperación de hierro sin aireación en solución por etapa de cada muestra en la 50.27% -325 mallas.

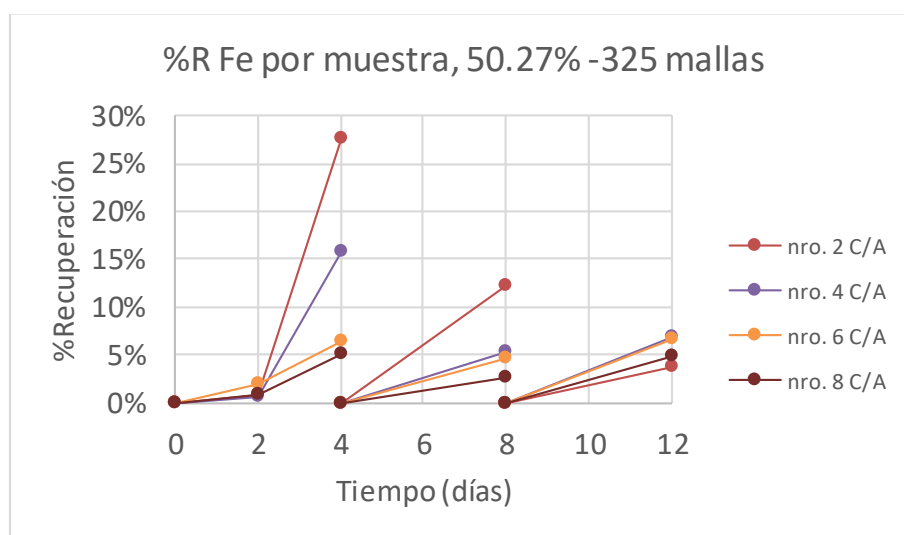


Figura N° 49. Recuperación de hierro con aireación en solución por etapa de cada muestra en la 50.27% -325 mallas.

Tabla 45

Tabla de datos del %R As en solución de la 50.27% -325 mallas por etapa

		Aireación	1° Etapa	2° Etapa	3° Etapa	Acumulado
50.27% -325 mallas	1	No	19.47%	5.62%	5.78%	30.87%
	2	Sí	25.72%	2.74%	2.38%	30.83%
	3	No	13.97%	2.59%	3.43%	19.99%
	4	Sí	17.94%	1.82%	3.05%	22.81%
	5	No	12.39%	1.90%	2.18%	16.47%
	6	Sí	12.13%	2.55%	3.30%	17.99%
	7	No	8.55%	2.16%	5.35%	16.05%
	8	Sí	8.65%	6.10%	1.79%	16.54%

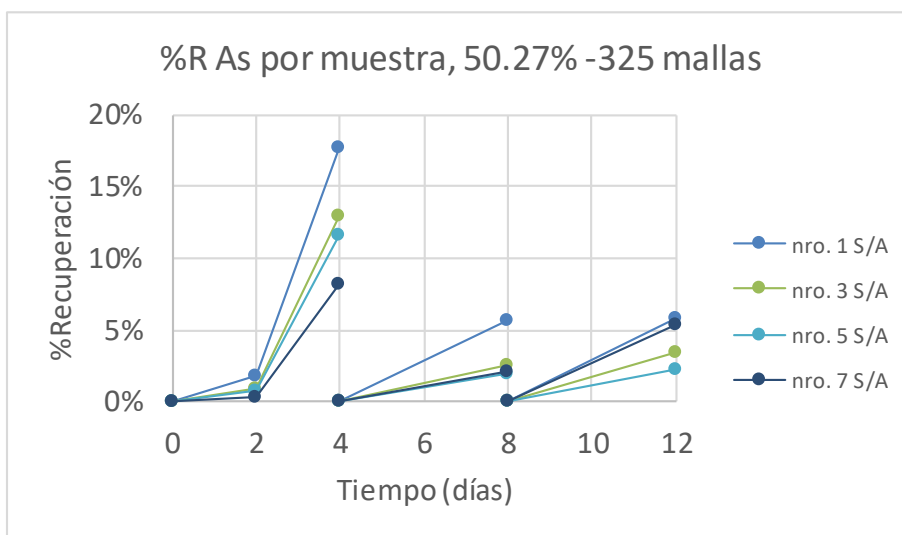


Figura N° 50. Recuperación de arsénico sin aireación en solución por etapa de cada muestra en la 50.27% -325 mallas.

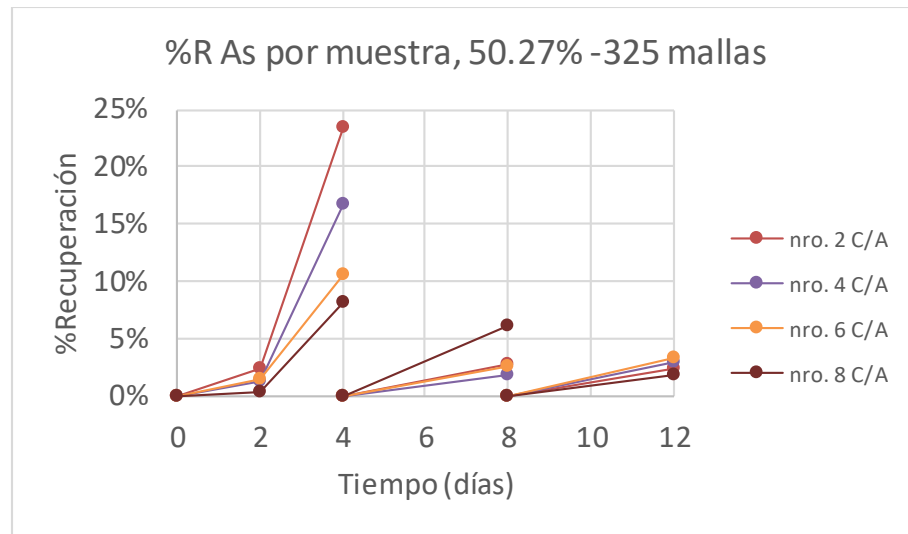


Figura N° 51. Recuperación de arsénico con aireación en solución por etapa de cada muestra en la 50.27% -325 mallas.

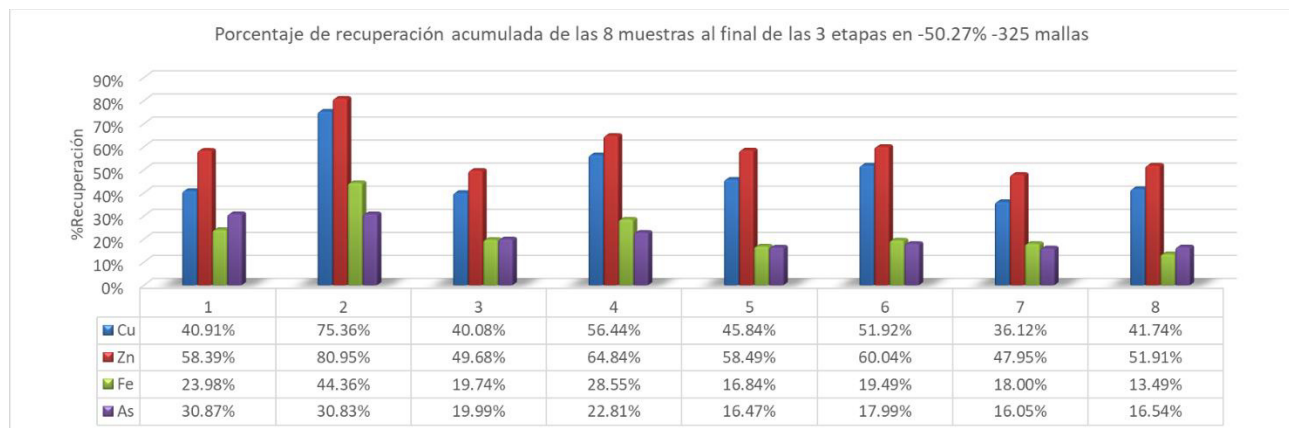


Figura N° 52. Representación gráfica del resumen de la recuperación de los metales de interés (Cu, Zn, Fe y As) en solución al término de las pruebas de biolixiviación en 50.27% -325 mallas.

Fuente: Elaborado usando Excel 2013



Figura N° 53. Cepas bacterianas readaptadas a la muestra.

A) Izquierda: Cepa bacteriana con alta concentración de los metales de interés obtenida al término de la tercera etapa en 50.27% -325 mallas lista para usar inóculo en 88.09% -100 mallas. B) Derecha: Cepas bacterianas reactivadas usadas al inicio de los ensayos para la 50.27% -325 mallas.

Fuente: Imagen tomada en el laboratorio de Biometalurgia

4.1.3.2. Control del Crecimiento de la Población Bacteriana en los Días Durante las

Etapas de Biolixiviación en 50.27%-325 mallas.

Resumen del comportamiento de la población bacteriana en el tiempo durante la primera etapa de la prueba de biolixiviación en 50.27% -325 mallas.

Tabla 46

Conteo de la población bacteriana en células/mL de la primera etapa

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	3.90E+07	4.50E+06	4.75E+07	1.05E+08	1.63E+08
2	Sí	3.90E+07	4.75E+06	2.95E+07	8.13E+07	1.33E+08
3	No	3.90E+07	7.00E+06	5.85E+07	9.03E+07	1.22E+08
4	Sí	3.90E+07	2.50E+06	2.90E+07	6.85E+07	1.08E+08
5	No	3.90E+07	3.75E+06	5.65E+07	1.77E+08	2.98E+08
6	Sí	3.90E+07	1.25E+06	2.58E+07	1.07E+08	1.88E+08
7	No	3.90E+07	6.50E+06	4.40E+07	1.87E+08	3.30E+08
8	Sí	3.90E+07	1.00E+06	1.93E+07	2.14E+08	4.08E+08

Nota: Cuantificadas en células/mL a 1000 aumentos en el microscopio óptico del laboratorio de Biometalurgia, EP de Ingeniería Metalúrgica, UNMSM.

Resumen del comportamiento de la población bacteriana en el tiempo durante la segunda etapa de la prueba de biolixiviación en 50.27% -325 mallas.

Tabla 47

Conteo de la población bacteriana en células/mL de la segunda etapa

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	1.98E+07	2.03E+07	2.07E+07	3.08E+07	4.08E+07
2	Sí	1.35E+07	1.55E+07	1.75E+07	4.05E+07	6.35E+07
3	No	2.95E+07	6.35E+07	9.75E+07	9.82E+07	9.88E+07
4	Sí	2.65E+07	3.45E+07	4.25E+07	6.90E+07	9.55E+07
5	No	4.00E+07	5.63E+07	7.25E+07	1.15E+08	1.57E+08
6	Sí	2.15E+07	2.70E+07	3.25E+07	8.38E+07	1.35E+08
7	No	5.20E+07	1.30E+08	2.08E+08	2.19E+08	2.29E+08
8	Sí	2.23E+07	1.01E+08	1.80E+08	1.94E+08	2.08E+08

Nota: Cuantificadas en células/mL a 1000 aumentos en el microscopio óptico del laboratorio de Biometalurgia, EP de Ingeniería Metalúrgica, UNMSM.

Resumen del comportamiento de la población bacteriana en el tiempo durante la tercera etapa de la prueba de biolixiviación en 50.27% -325 mallas.

Tabla 48

Conteo de la población bacteriana en células/mL de la tercera etapa

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	1.63E+07	2.12E+07	2.60E+07	2.18E+07	1.75E+07
2	Sí	1.25E+07	1.98E+07	2.70E+07	2.53E+07	2.35E+07
3	No	2.38E+07	2.69E+07	3.00E+07	3.70E+07	4.40E+07
4	Sí	2.20E+07	3.35E+07	4.50E+07	5.38E+07	6.25E+07
5	No	4.00E+07	5.63E+07	7.25E+07	7.88E+07	8.50E+07
6	Sí	1.50E+07	4.75E+07	8.00E+07	1.00E+08	1.20E+08
7	No	4.85E+07	8.93E+07	1.30E+08	1.60E+08	1.90E+08
8	Sí	2.75E+07	8.88E+07	1.50E+08	1.83E+08	2.15E+08

Nota: Cuantificadas en células/mL a 1000 aumentos en el microscopio óptico del laboratorio de Biometalurgia, EP de Ingeniería Metalúrgica, UNMSM.

Resumen del comportamiento en el crecimiento bacteriano en el tiempo durante las tres etapas de la prueba de biolixiviación en 50.27% -325 mallas.

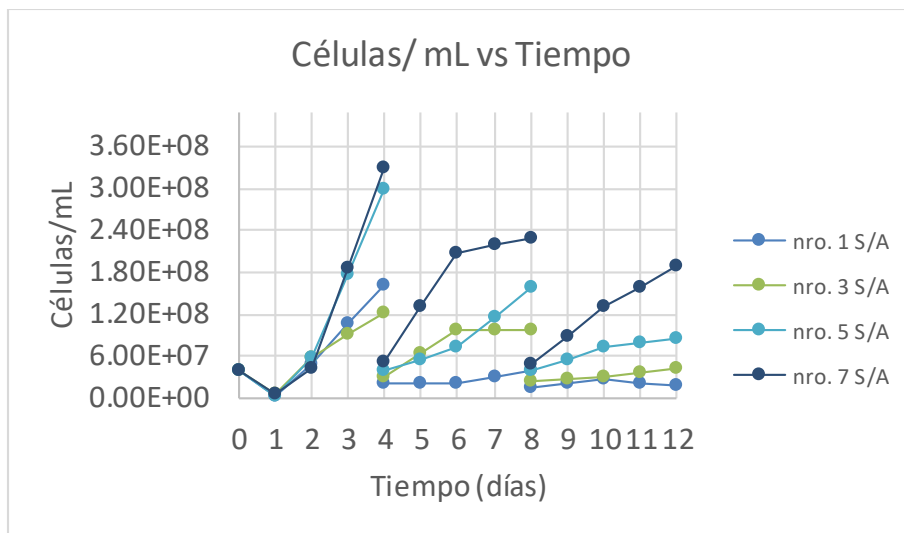


Figura N° 54. Comportamiento del crecimiento bacteriano en las muestras sin aireación en 50.27% -325 mallas, durante el tiempo en las tres etapas de la prueba de biolixiviación.

Al término de cada etapa, se cambió la solución en cada muestra (PLS) presente en los matraces por el medio líquido 9K (sin sulfato ferroso).

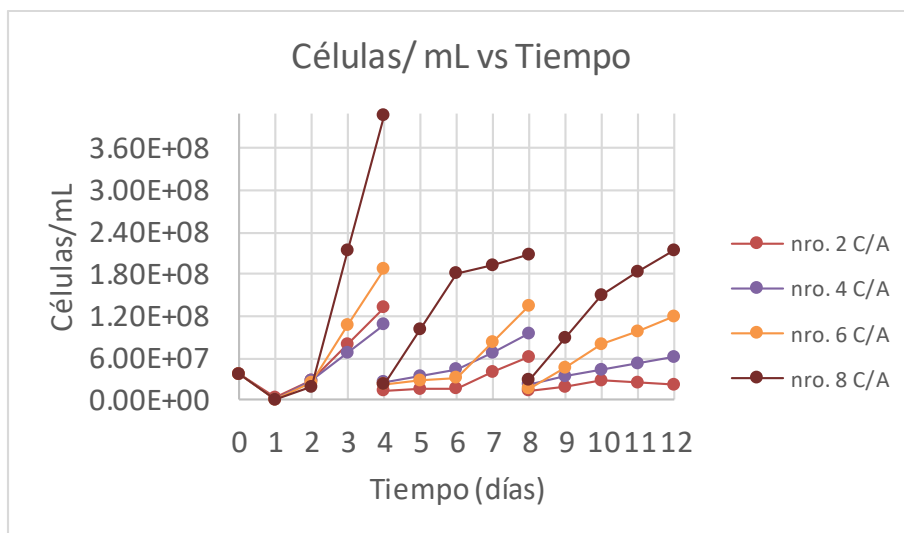


Figura N° 55. Comportamiento del crecimiento bacteriano en las muestras con aireación en 50.27% -325 mallas, durante el tiempo en las tres etapas de la prueba de biolixiviación.

Al término de cada etapa, se cambió la solución en cada muestra (PLS) presente en los matraces por el medio líquido 9K (sin sulfato ferroso).



Figura N° 56. Fotografía de *Thiobacillus ferrooxidans* (dentro de los círculos amarillos) vista a 1,000 aumentos en la cámara de Neubauer en el microscopio óptico al finalizar la tercera y última etapa de biolixiviación en 50.27% - 325 mallas.

Fuente: Imagen tomada en el laboratorio de Biometalurgia

4.1.3.3. Respuesta del Potencial Óxido Reducción en los Días Durante las Etapas de Biolixiviación en 50.27%-325 mallas.

Resumen del Potencial Óxido Reducción en el tiempo durante la primera etapa de la prueba de biolixiviación en 50.27% -325 mallas.

Tabla 49

Medición del Potencial Óxido Reducción en mV de la primera etapa

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	434	471	616	616	616
2	Sí	434	455	532	575	618
3	No	429	475	508	564	620
4	Sí	429	460	490	547	605
5	No	417	448	479	538	596
6	Sí	417	448	479	540	600
7	No	387	388	428	458	488
8	Sí	387	410	433	475	516

Resumen del Potencial Óxido Reducción en el tiempo durante la segunda etapa de la prueba de biolixiviación en 50.27% -325 mallas.

Tabla 50

Medición del Potencial Óxido Reducción en mV de la segunda etapa

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	583	598	612	612	612
2	Sí	594	607	620	626	631
3	No	602	608	614	613	611
4	Sí	599	608	617	617	618
5	No	587	598	608	612	616
6	Sí	526	565	605	608	612
7	No	460	537	594	596	598
8	Sí	433	451	469	496	524

Resumen del Potencial Óxido Reducción en el tiempo durante la tercera etapa de la prueba de biolixiviación en 50.27% -325 mallas.

Tabla 51

Medición del Potencial Óxido Reducción en mV de la tercera etapa.

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	512	547	583	583	583
2	Sí	555	585	616	614	612
3	No	571	591	611	607	602
4	Sí	587	599	612	621	630
5	No	574	588	602	607	612
6	Sí	577	596	614	623	632
7	No	463	479	496	526	556
8	Sí	449	467	485	541	598

Resumen del Potencial Óxido Reducción en el tiempo durante las tres etapas de la prueba de biolixiviación en 50.27% -325 mallas.

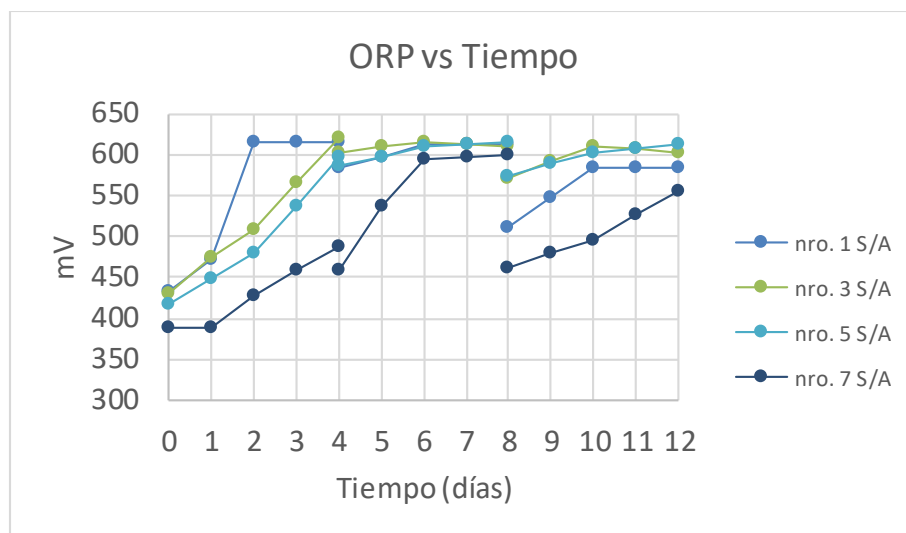


Figura N° 57. Respuesta del Óxido Potencial Reducción de las muestras sin aireación en 50.27% -325 mallas, durante el tiempo en las tres etapas de la prueba de biolixiviación.

Al término de cada etapa, se cambió la solución en cada muestra (PLS) presente en los matraces por el medio líquido 9K (sin sulfato ferroso).

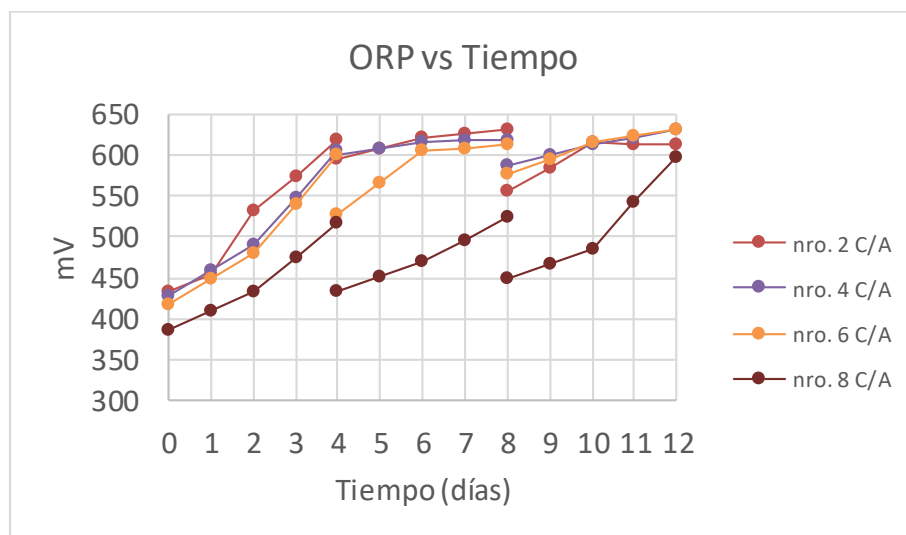


Figura N° 58. Respuesta del Óxido Potencial Reducción de las muestras con aireación en 50.27% -325 mallas, durante el tiempo en las tres etapas de la prueba de biolixiviación.

Al término de cada etapa, se cambió la solución en cada muestra (PLS) presente en los matraces por el medio líquido 9K (sin sulfato ferroso).

**4.1.3.4. Respuesta del Oxígeno Disuelto en los Días Durante las Etapas de
Biolixiviación en 50.27%-325 mallas.**

Resumen de la respuesta del oxígeno disuelto en solución (DO) cuantificada en partes por millón (ppm) en el tiempo durante la primera etapa de la prueba de biolixiviación en 50.27% - 325 mallas.

Tabla 52

Respuesta del oxígeno disuelto en ppm en el tiempo durante la primera etapa

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	4.23	3.41	1.20	1.12	1.04
2	Sí	4.23	2.84	0.76	0.77	0.77
3	No	4.07	2.73	0.76	0.72	0.68
4	Sí	4.07	3.18	0.78	0.96	1.14
5	No	3.51	2.74	0.79	0.73	0.66
6	Sí	3.51	2.94	0.81	0.98	1.15
7	No	3.82	2.52	0.82	0.75	0.68
8	Sí	3.82	2.76	0.85	0.80	0.74

Resumen de la respuesta del oxígeno disuelto en solución (DO) cuantificada en partes por millón (ppm) en el tiempo durante la segunda etapa de la prueba de biolixiviación en 50.27% - 325 mallas.

Tabla 53

Respuesta del oxígeno disuelto en ppm en el tiempo durante la segunda

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	2.87	2.85	2.83	3.10	3.36
2	Sí	2.82	2.84	2.85	3.25	3.65
3	No	2.59	2.49	2.39	2.58	2.76
4	Sí	1.77	2.01	2.25	2.65	3.05
5	No	1.29	1.17	1.04	1.73	2.42
6	Sí	1.14	1.31	1.48	2.01	2.54
7	No	0.74	0.76	0.78	0.85	0.92
8	Sí	0.78	1.19	1.29	1.18	1.06

Resumen de la respuesta del oxígeno disuelto en solución (DO) cuantificada en partes por millón (ppm) en el tiempo durante la tercera etapa de la prueba de biolixiviación en 50.27% -325 mallas.

Tabla 54

Respuesta del oxígeno disuelto en ppm en el tiempo durante la tercera

Nro.	Aireación	Tiempo(días)				
		0	1	2	3	4
1	No	3.52	3.25	2.97	3.64	4.30
2	Sí	3.42	3.24	3.05	3.47	3.88
3	No	2.44	2.34	2.24	2.84	3.44
4	Sí	1.85	1.81	1.77	2.37	2.96
5	No	2.05	1.84	1.63	2.23	2.83
6	Sí	1.05	1.38	1.70	2.04	2.37
7	No	0.88	0.80	0.72	0.78	0.84
8	Sí	0.92	0.83	0.74	0.77	0.80

Resumen de la respuesta del oxígeno disuelto en solución (DO) cuantificada en partes por millón (ppm) en el tiempo durante las tres etapas de la prueba de biolixiviación en 50.27% -325 mallas.

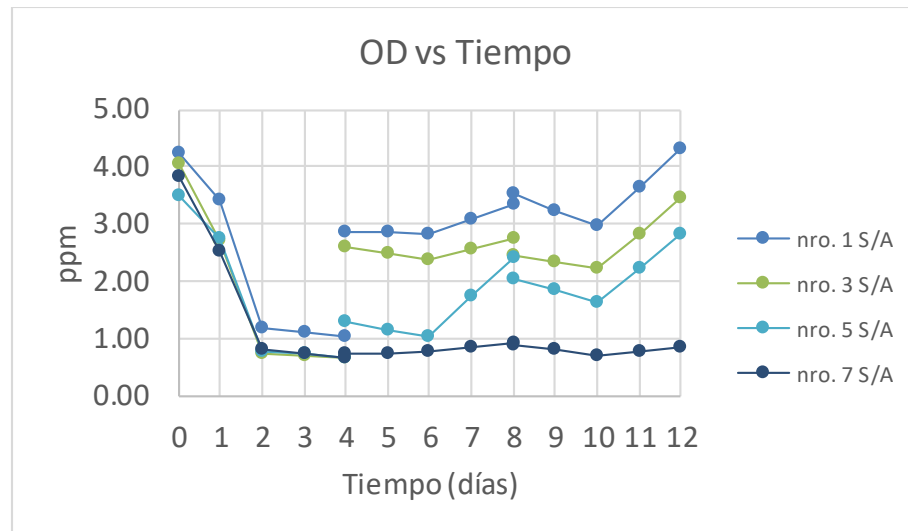


Figura N° 59. Respuesta del oxígeno en solución de todas las muestras sin aireación en 50.27% -325 mallas durante el tiempo en las tres etapas.

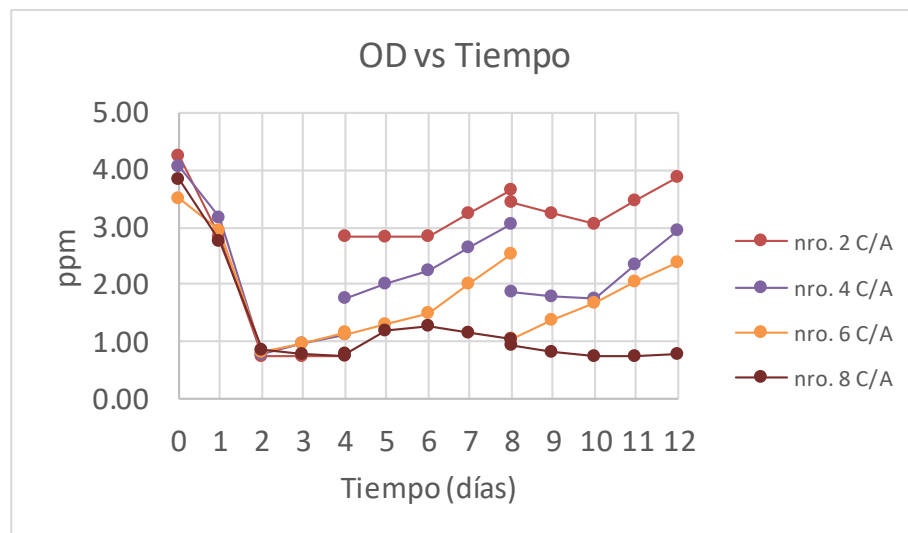


Figura N° 60. Respuesta del oxígeno en solución de todas las muestras con aireación en 50.27% -325 mallas durante el tiempo en las tres etapas.



Figura N° 61. Resultado de las muestras en 50.27% -325 mallas pretratadas para su posterior cianuración.
Fuente: Imagen tomada en el laboratorio de Biometalurgia



Figura N° 62. Muestra antes y después del tratamiento de biolixiviación en 50.27% -325 mallas.
Se observa cualitativamente el cambio de color producto de la oxidación de los principales sulfuros en la muestra.
Fuente: Imagen tomada en el laboratorio de Biometalurgia

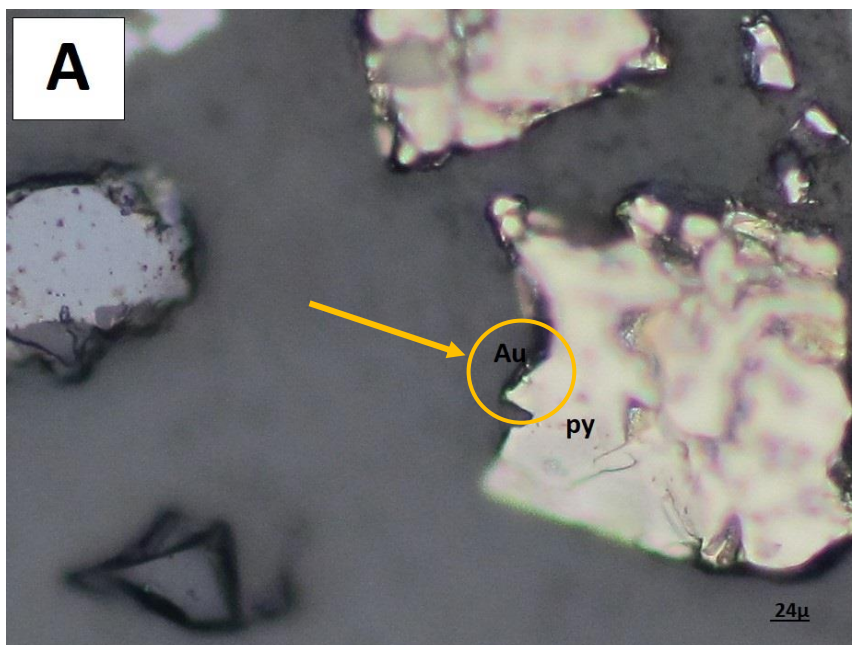


Figura N° 63. Vista de microscopía óptica de minerales opacos en una de las muestras posbiolixiviación. A) Partículas libres de pirita (py), gangas (GGs) y partícula entrelazada de pirita (py) con oro (Au). 500X. La liberación parcial de la partícula de oro (Au) se dio por la disolución de la pirita (py) gracias a la acción del mecanismo de lixiviación bacteriana por *Acidithiobacillus ferrooxidans*.
Fuente: Elaborado por FA Ingenieros

4.1.4. Diseño experimental en la prueba de Biolixiviación.

4.1.4.1. Diseño Experimental Factorial Completo para el Porcentaje de Recuperación de Fierro en Solución en el Acumulado.

4.1.4.1.1. Resumen del Diseño Experimental con Respuesta el %Rec. Fe.

El diseño experimental utilizado en las pruebas de pretratamiento fue el diseño factorial completo de 2 factores a diferentes niveles y 12 corridas por duplicado para el fierro y el arsénico, analizado en el acumulado por absorción atómica (AA).

Tabla 55

Resumen del Diseño para el DOE con %Rec. Fe en el acumulado

Factores:	2	Réplicas:	2
Corridas base:	12	Total de corridas:	24
Bloques base:	1	Total de bloques:	1

Nota: Número de niveles: 4; 3.

Tabla 56

Información del Factor

Factor	Niveles	Valores
%Sólidos en la pulpa	4	5; 10; 15; 20 88.09% -100 mallas
Mallas	3	65.23% -200 mallas 50.27% -325 mallas

En la siguiente tabla, las columnas etiquetadas como “OrdenCorrida” (C2) nos indican el orden de recolección de los datos. Para un diseño aleatorio, las columnas etiquetadas con el nombre de “OrdenEstándar” (C1) y “OrdenCorrida” (C2) tendrían valores desiguales. Al no agregársele puntos centrales ni ejecutar las corridas en bloques, Minitab 18 estableció todos los valores de la columna tres (C3) y la columna cuatro (C4) iguales a 1. Por último, los factores al ser ingresados son almacenados en las columnas “%Sólidos en la Pulpa” (C5) y “Mallas” (C6).

Tabla 57

Estructura de los ensayos para la recuperación de Fe acumulado en solución

OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	%Sólidos en la pulpa	Mallas	%Rec. Fe
1	1	1	1	5	88.09% -100 mallas	16.44
2	2	1	1	5	65.23% -200 mallas	7.99
3	3	1	1	5	50.27% -325 mallas	44.36
4	4	1	1	10	88.09% -100 mallas	18.59
5	5	1	1	10	65.23% -200 mallas	19.22
6	6	1	1	10	50.27% -325 mallas	28.55
7	7	1	1	15	88.09% -100 mallas	14.77
8	8	1	1	15	65.23% -200 mallas	29.14
9	9	1	1	15	50.27% -325 mallas	19.49
10	10	1	1	20	88.09% -100 mallas	12.37
11	11	1	1	20	65.23% -200 mallas	14.72
12	12	1	1	20	50.27% -325 mallas	13.49
13	13	1	1	5	88.09% -100 mallas	16.81
14	14	1	1	5	65.23% -200 mallas	6.84
15	15	1	1	5	50.27% -325 mallas	44.22
16	16	1	1	10	88.09% -100 mallas	17.48
17	17	1	1	10	65.23% -200 mallas	22.63
18	18	1	1	10	50.27% -325 mallas	28.73
19	19	1	1	15	88.09% -100 mallas	15.88
20	20	1	1	15	65.23% -200 mallas	25.69
21	21	1	1	15	50.27% -325 mallas	19.67
22	22	1	1	20	88.09% -100 mallas	12.00
23	23	1	1	20	65.23% -200 mallas	15.87
24	24	1	1	20	50.27% -325 mallas	13.24

4.1.4.1.2. Análisis de Varianza (ANOVA) para el %Rec. como Respuesta.

Tabla 58
ANOVA para el %Rec. de Fe

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	11	2086.65	189.695	156.66	0.000
Lineal	5	866.45	173.291	143.11	0.000
%Sólidos en la pulpa	3	332.83	110.942	91.62	0.000
Mallas	2	533.63	266.814	220.35	0.000
Interacciones de 2 términos	6	1220.19	203.366	167.95	0.000
%Sólidos en la pulpa*Mallas	6	1220.19	203.366	167.95	0.000
Error	12	14.53	1.211		
Total	23	2101.18			

Nota: Los efectos principales son los menores al nivel de significancia 0.05, P -Values (columna p), estos están resaltados en la tabla.

Tabla 59
Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1.10039	99.31%	98.67%	97.23%

“S” simboliza la desviación estándar de la distancia entre los valores de datos y los valores ajustados. Esta respuesta indica que la desviación estándar entre los puntos de datos alrededor de los valores ajustados es 1.10039.

El “R- cuad.” indica, en este caso, un favorable ajuste del modelo a los datos.

El “R- cuad. (ajustado)” se define como el porcentaje de la variación en la respuesta anticipada y explicada por el modelo, siendo ajustado para el número de predictores en el modelo relativo al número de observaciones.

Se utiliza la simbología “R- cuad. (pred)” o “R- cuad. pronosticado” con el fin de determinar si el modelo al predecir la respuesta para nuevas observaciones lo hace muy bien o qué tan bien.

Los modelos que poseen los valores mayores de R- cuad. (pred) poseen mejor capacidad en la predicción. Para 97.23% de R- cuad. (pred) se puede decir que está ligeramente sobre ajustado ya que el valor de 99.31% de R- cuad. es un poco mayor.

Tabla 60

Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

OrdenCorrida	%Rec. Fe	Ajuste	Resid	Resid est.	
5	19.220	20.925	-1.705	-2.19	R
8	29.140	27.415	1.725	2.22	R
17	22.630	20.925	1.705	2.19	R
20	25.690	27.415	-1.725	-2.22	R

Nota: Residuo grande, R. Valores atípicos.

El concepto de residuo es la diferencia de un valor observado (y) y un valor ajustado correspondiente ($\bar{Y}$), y este es un valor pronosticado por dicho modelo.

Se trata de valores atípicos en los datos, ya que los valores absolutos de los residuos estandarizados son mayores que 2. Minitab al hacer sus observaciones, estos no siguen de manera adecuada la ecuación de regresión anteriormente propuesta.

En un histograma, las barras aisladas en los extremos identifican los valores atípicos. Se recomienda identificar y analizar el motivo de cualquier valor atípico, corregir cualquier error en el input de datos o en la medición. Considerar la eliminación de datos asociados a cualquier evento anormal y único (causas especiales). Por consiguiente, repetir el análisis.

Los valores atípicos aparecen a los extremos debido a que se presentan diferentes curvas de comportamiento en un solo gráfico de residuos ([Fig. 66](#) y [Tabla 60](#)) esto sucede debido a que estamos agrupando las distintas mallas, con fines ilustrativos, sabiendo que tienen comportamientos distintos en cuanto a la recuperación del hierro. Analizamos la data de cada variable categórica y no encontramos valores atípicos previos al tratamiento ([Fig. 64](#)).

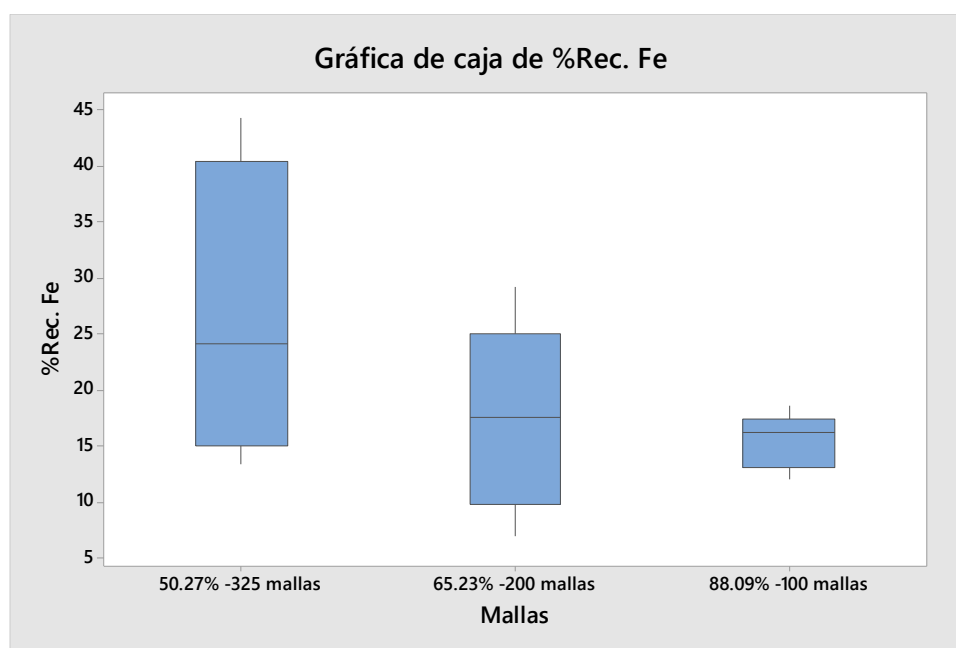


Figura N° 64. Gráfica de Caja para el diagnóstico de valores atípicos en el %Rec. de Fe.

Nota: No se encontraron valores atípicos.

Fuente: Elaborado usando Minitab 18

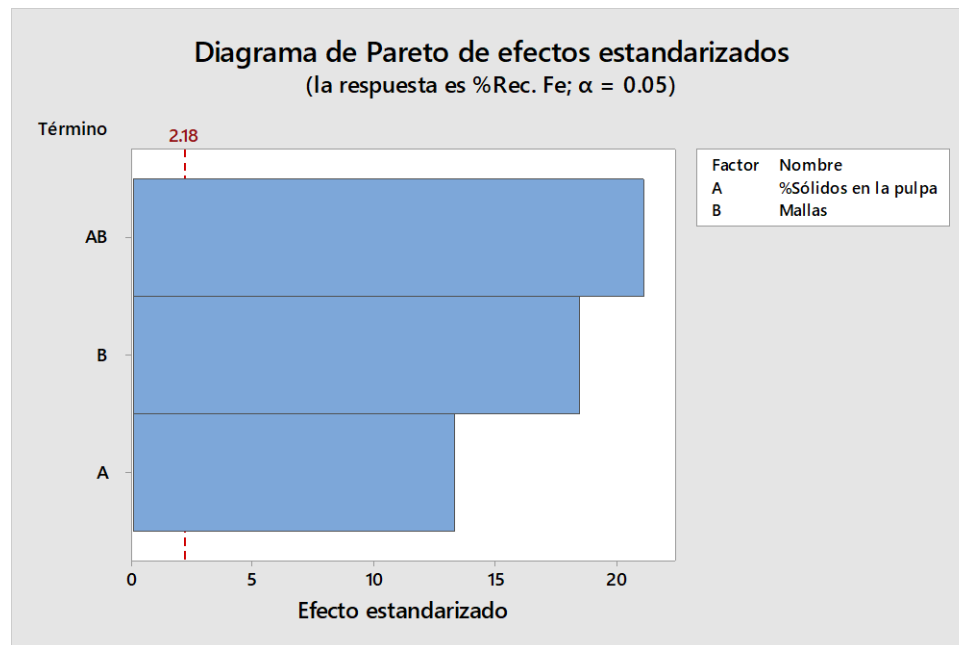


Figura N° 65. Diagrama de Pareto de los efectos principales en función a la respuesta (%Rec. Fe).
Nota: Efectos por encima del valor de 2.18 son efectos significativos.

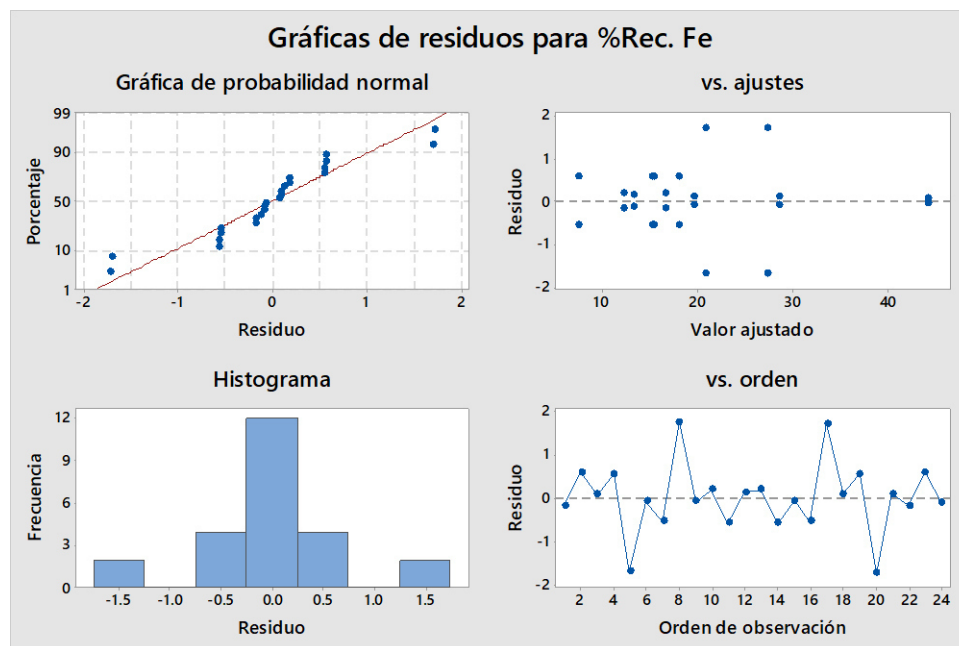


Figura N° 66. Gráfica de Residuos 4 en 1 en función a la respuesta (%Rec. Fe).

Nota: Histograma de distribución normal, indicándonos la estabilidad del proceso, pero con valores atípicos a los extremos debido a que se presentan diferentes curvas de comportamiento en un solo gráfico de residuos. Residuos vs orden, nos muestra residuos ubicados aleatoriamente, residuos independientes entre sí.

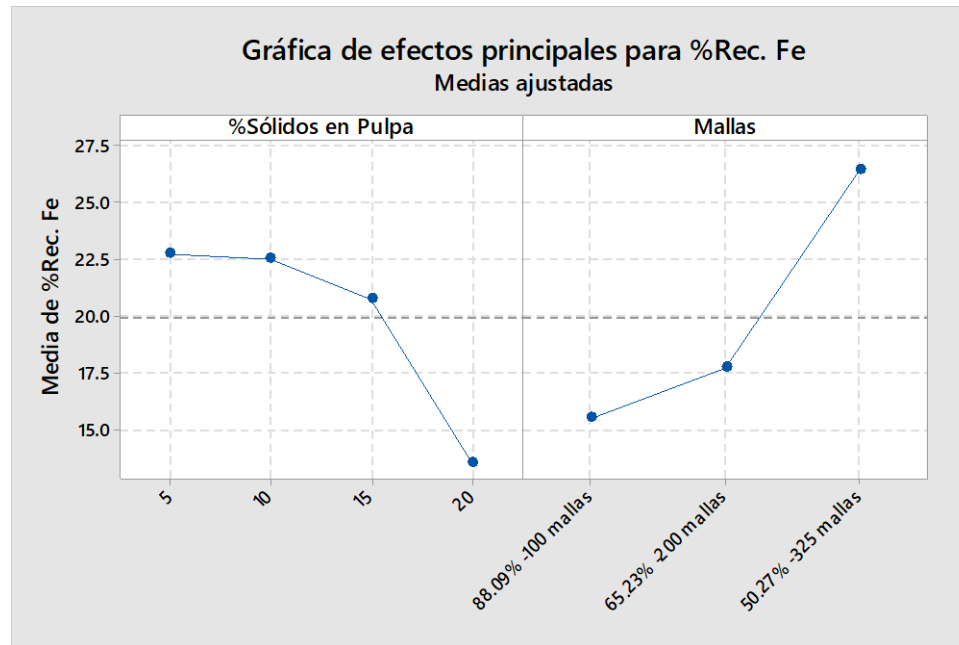


Figura N° 67. Efectos principales y su relación con el %Rec. Media de Fe.

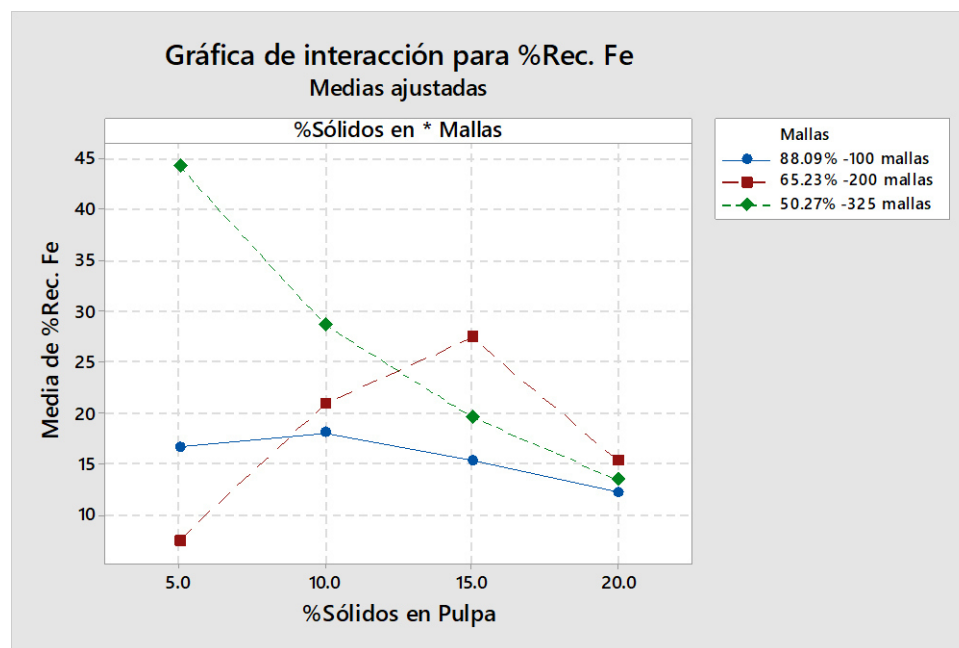


Figura N° 68. Interacción de las variables independientes y la Media de %Rec. de Fe.

4.1.4.1.3. Ecuación de regresión en las distintas Mallas para el %Rec. de Fe.

A continuación se muestran las ecuaciones obtenidas, usando el Minitab 18, de la regresión manteniendo como variable respuesta el porcentaje de recuperación de fierro (%Rec. de Fe), en función del porcentaje de sólidos en la pulpa (%SS) y en distintas granulometrías (categorías).

1) Regresión en 88.09% -100 mallas:

R- cuad.= 93.0%

S = 0.739001

$$\% \text{Rec. Fe} = 13.86 + 0.8169 * \% \text{SS} - 0.04550 * \% \text{SS}^2$$

(Ec. 33)

2) Regresión en 65.23% -200 mallas:

R- cuad.= 94.1%

S = 2.30307

$$\% \text{Rec. Fe} = -21.81 + 7.010 * \% \text{SS} - 0.2563 \% \text{SS}^2$$

(Ec. 34)

3) Regresión en 50.27% -325 mallas:

S = 0.482479

$$\% \text{Rec. Fe} = 66.1484 * e^{(-0.0814705 * \% \text{SS})}$$

(Ec. 35)

*Minitab 18 no calcula “R- cuad.”, para modelos no lineales porque la literatura de investigación muestra que es una estadística de bondad de ajuste no válida para este modelo.

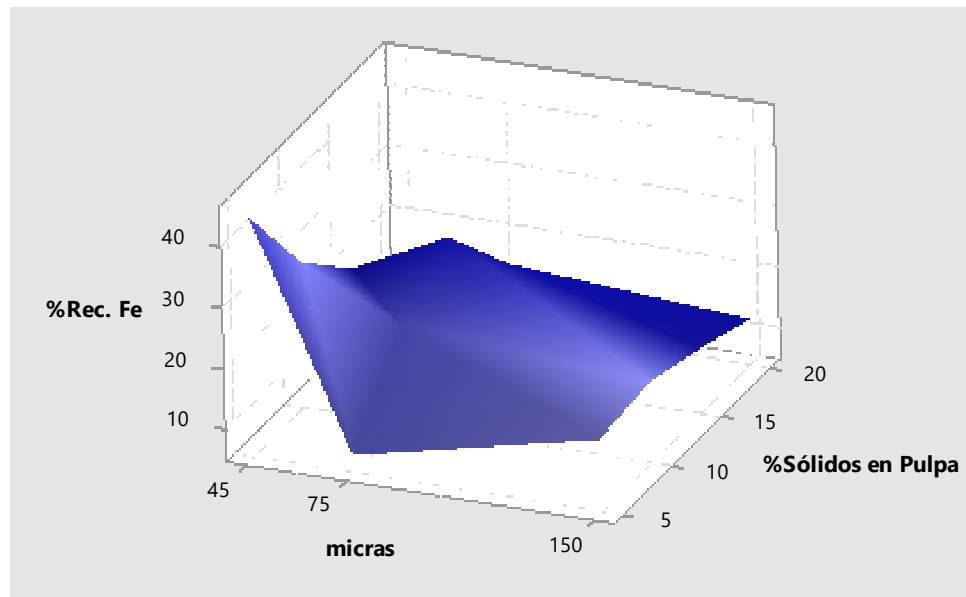


Figura N° 69. Superficie del % Rec. de Fe en función al %Sólidos en la pulpa y la granulometría (Mallas).

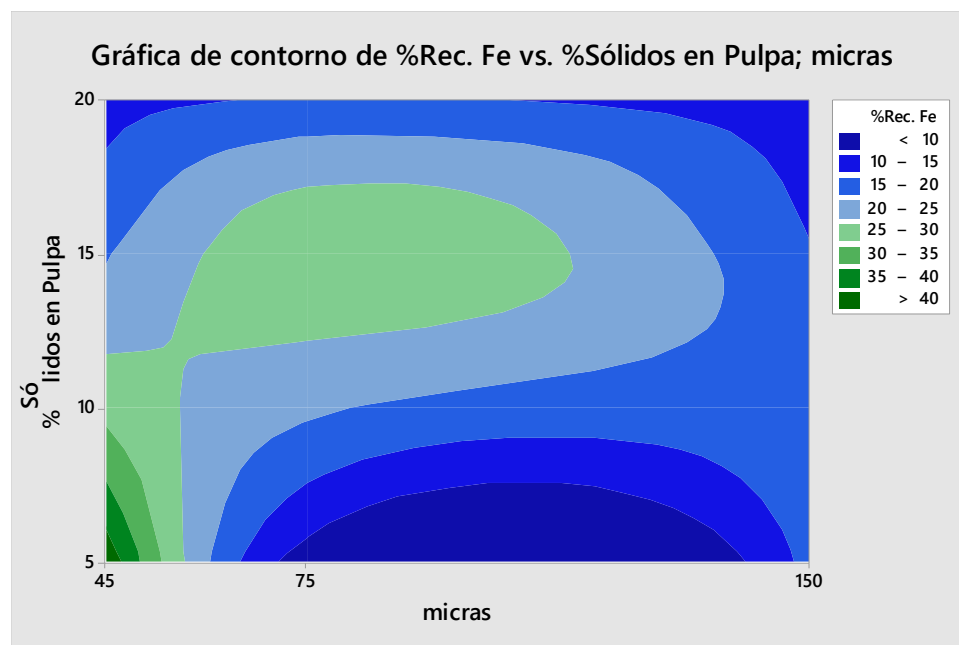


Figura N° 70. Superficie del %Rec. de Fe en función a las variables independientes desde la vista horizontal.

4.1.4.2. Diseño Experimental Factorial Completo para el Porcentaje de Recuperación de Arsénico en Solución en el Acumulado.

4.1.4.2.1. Resumen del Diseño Experimental con Respuesta el %Rec. As.

El diseño experimental utilizado en las pruebas de pretratamiento fue el diseño factorial completo de 2 factores a diferentes niveles y 12 corridas por duplicado para el fierro y el arsénico, analizado en el acumulado por absorción atómica (AA).

Tabla 61

Resumen del diseño para el DOE con %Rec. As en el acumulado

Factores:	2	Réplicas:	2
Corridas base:	12	Total de corridas:	24
Bloques base:	1	Total de bloques:	1

Número de niveles: 4; 3

Tabla 62

Información del Factor

Factor	Niveles	Valores
%Sólidos en la pulpa	4	5; 10; 15; 20 88.09% -100 mallas
Mallas	3	65.23% -200 mallas 50.27% -325 mallas

En la siguiente tabla, las columnas etiquetadas como “OrdenCorrida” (C2) nos indican el orden de recolección de los datos. Para un diseño aleatorio, las columnas etiquetadas con el nombre de “OrdenEstándar” (C1) y “OrdenCorrida” (C2) tendrían valores desiguales. Al no agregársele puntos centrales ni ejecutar las corridas en bloques, Minitab 18 estableció todos los valores de la columna tres (C3) y la columna cuatro (C4) iguales a 1. Por último, los factores al ser ingresados son almacenados en las columnas “%Sólidos en la Pulpa” (C5) y “Mallas” (C6).

Tabla 63

Estructura de los ensayos para la recuperación de As acumulado en solución

OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	%Sólidos en la pulpa	Mallas	%Rec. As
1	1	1	1	5	88.09% -100 mallas	14.83
2	2	1	1	5	65.23% -200 mallas	7.56
3	3	1	1	5	50.27% -325 mallas	30.83
4	4	1	1	10	88.09% -100 mallas	24.91
5	5	1	1	10	65.23% -200 mallas	20.93
6	6	1	1	10	50.27% -325 mallas	22.81
7	7	1	1	15	88.09% -100 mallas	27.42
8	8	1	1	15	65.23% -200 mallas	32.85
9	9	1	1	15	50.27% -325 mallas	17.99
10	10	1	1	20	88.09% -100 mallas	18.38
11	11	1	1	20	65.23% -200 mallas	19.29
12	12	1	1	20	50.27% -325 mallas	16.54
13	13	1	1	5	88.09% -100 mallas	14.63
14	14	1	1	5	65.23% -200 mallas	6.36
15	15	1	1	5	50.27% -325 mallas	30.51
16	16	1	1	10	88.09% -100 mallas	25.51
17	17	1	1	10	65.23% -200 mallas	24.54
18	18	1	1	10	50.27% -325 mallas	23.13
19	19	1	1	15	88.09% -100 mallas	26.82
20	20	1	1	15	65.23% -200 mallas	29.25
21	21	1	1	15	50.27% -325 mallas	18.81
22	22	1	1	20	88.09% -100 mallas	18.58
23	23	1	1	20	65.23% -200 mallas	20.49
24	24	1	1	20	50.27% -325 mallas	15.74

4.1.4.2.2. Análisis de Varianza (ANOVA) para el %Rec. como respuesta.

Tabla 64
ANOVA para el %Rec. de As

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	11	1061.03	96.457	74.22	0.000
Lineal	5	301.79	60.358	46.45	0.000
%Sólidos en la pulpa	3	287.13	95.710	73.65	0.000
Mallas	2	14.66	7.330	5.64	0.019
Interacciones de 2 términos	6	759.24	126.540	97.37	0.000
%Sólidos en la pulpa*Mallas	6	759.24	126.540	97.37	0.000
Error	12	15.59	1.300		
Total	23	1076.63			

Nota: Los efectos principales son los menores al nivel de significancia 0.05, P-Values (columna p), estos están resaltados en la tabla.

Tabla 65
Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1.13998	98.55%	97.22%	94.21%

“S” simboliza la desviación estándar de la distancia entre los valores de los datos y valores ajustados. El resultado establece una desviación estándar de 1.13998 (puntos de datos alrededor de los valores ajustados), valor mayor que en la recuperación de fierro en solución en el pretratamiento de biolixiviación.

Al tener un valor de R- cuad. (pred) mucho más grande, los modelos poseen mejor capacidad en la predicción de las respuestas. Para 94.21% de R- cuad. (pred) se puede decir que está ligeramente sobre ajustado ya que el valor de 98.55% de R- cuad. es un poco mayor.

Por lo tanto, en la recuperación de arsénico en solución, al tener un menor R- cuad. (pred) y R- cuad. que en la recuperación de fierro, se tiene una menor capacidad predictiva.

Tabla 66

Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

OrdenCorrida	%Rec. As	Ajuste	Resid	Resid est.	
5	20.930	22.735	-1.805	-2.24	R
8	32.850	31.050	1.800	2.23	R
17	24.540	22.735	1.805	2.24	R
20	29.250	31.050	-1.800	-2.23	R

Nota: Residuo grande, R. Valores atípicos.

Se trata de valores atípicos en los datos, ya que los valores absolutos de los residuos estandarizados son mayores que 2. Minitab etiqueta observaciones y estas no siguen de manera adecuada la ecuación de regresión ya propuesta.

Los residuos estandarizados de la recuperación de arsénico son mayores en cada corrida que en el fierro coincidiendo con su respectiva corrida. Los residuos estandarizados miden el error en cada observación, siendo los de arsénico mayores que los de fierro como respuesta el porcentaje de recuperación en solución de cada metal en su respectivo modelo y corrida.

En un histograma, las barras aisladas en los extremos identifican los valores atípicos. Se recomienda identificar y analizar el motivo de cualquier valor no típico, corregir errores en el input (valores de entrada) y/o de medición en los datos. Tener en cuenta mitigar los valores en los datos que presenten asociaciones con eventos anormales, especiales y únicos (causas fundamentales tomadas en consideración). Por consiguiente, repetir el análisis.

Los valores atípicos aparecen a los extremos debido a que se presentan diferentes curvas de comportamiento en un solo gráfico de residuos ([Fig. 73](#) y [Tabla 66](#)) esto sucede debido a que estamos agrupando las distintas mallas, con fines ilustrativos, sabiendo que tienen comportamientos distintos en cuanto a la recuperación del arsénico. Analizamos la data de cada variable categórica y no encontramos valores atípicos previos al tratamiento ([Fig. 71](#)).

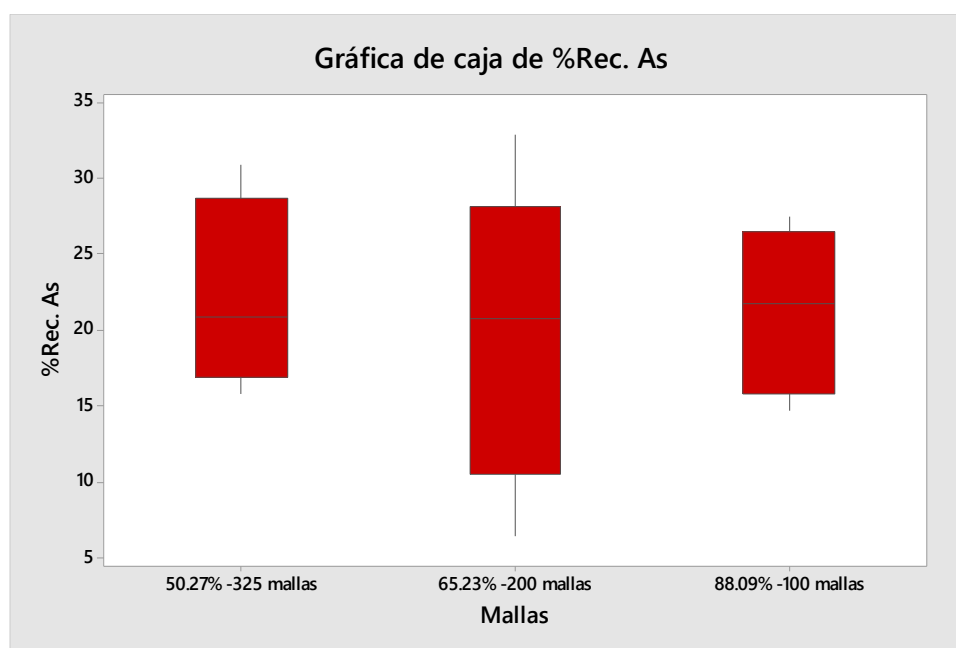


Figura N° 71. Gráfica de Caja para el diagnóstico de valores atípicos en el %Rec. de As.

Nota: No se encontraron valores atípicos.

Fuente: Elaborado usando Minitab 18

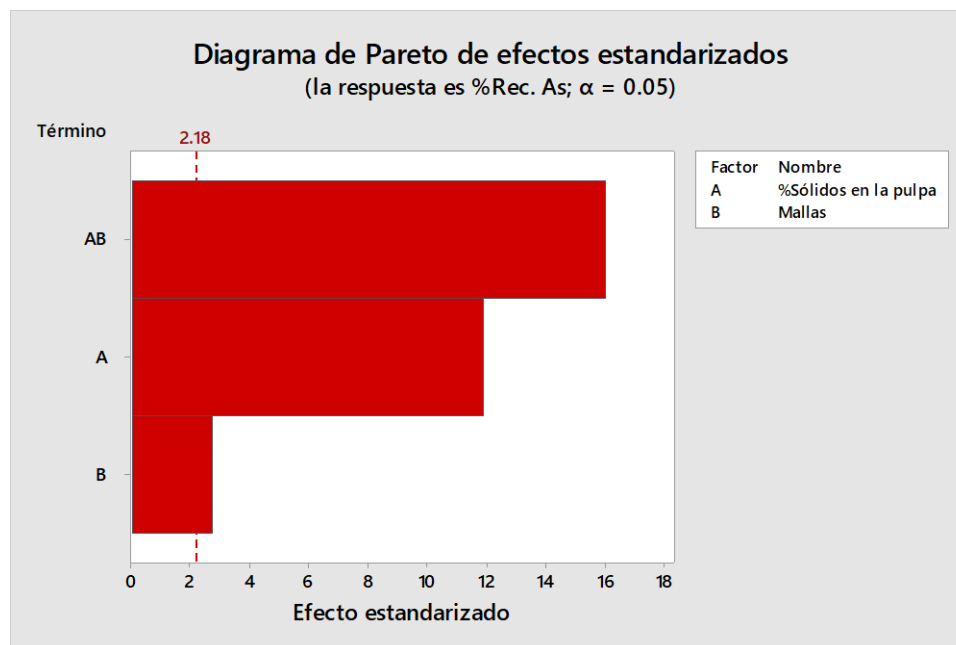


Figura N° 72. Diagrama de Pareto de los efectos principales en función a la respuesta (%Rec. As)
Nota: Efectos por encima del valor de 2.18 son efectos significativos.

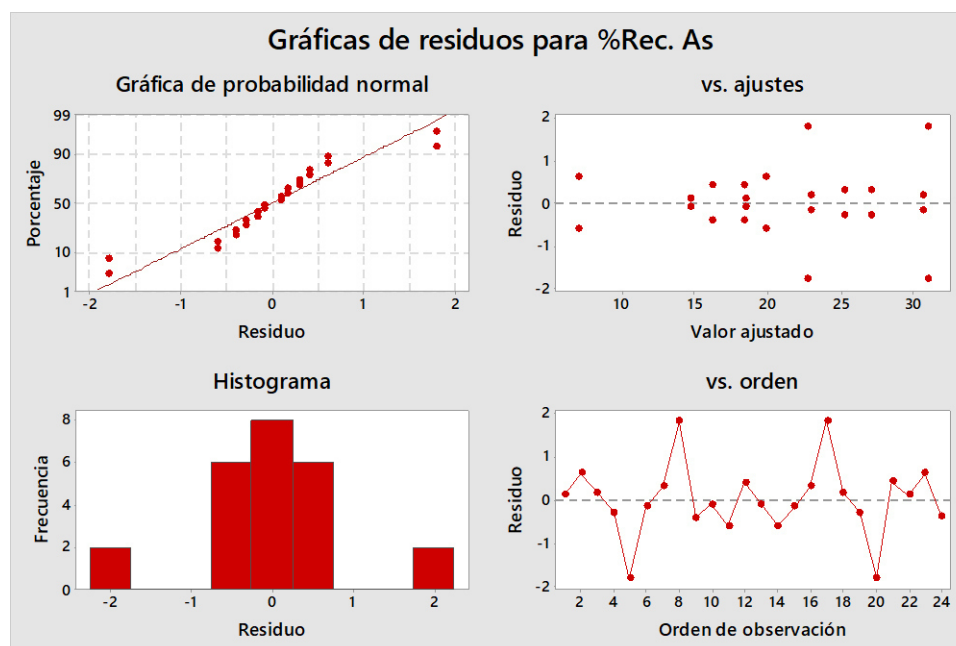


Figura N° 73. Gráfica de Residuos 4 en 1 en función a la respuesta (%Rec. As)

Nota: Histograma de distribución normal, indicándonos la estabilidad del proceso, pero con valores atípicos a los extremos debido a que se presentan diferentes curvas de comportamiento en un solo gráfico de residuos. Residuos vs orden, nos muestra residuos ubicados aleatoriamente, residuos independientes entre sí.

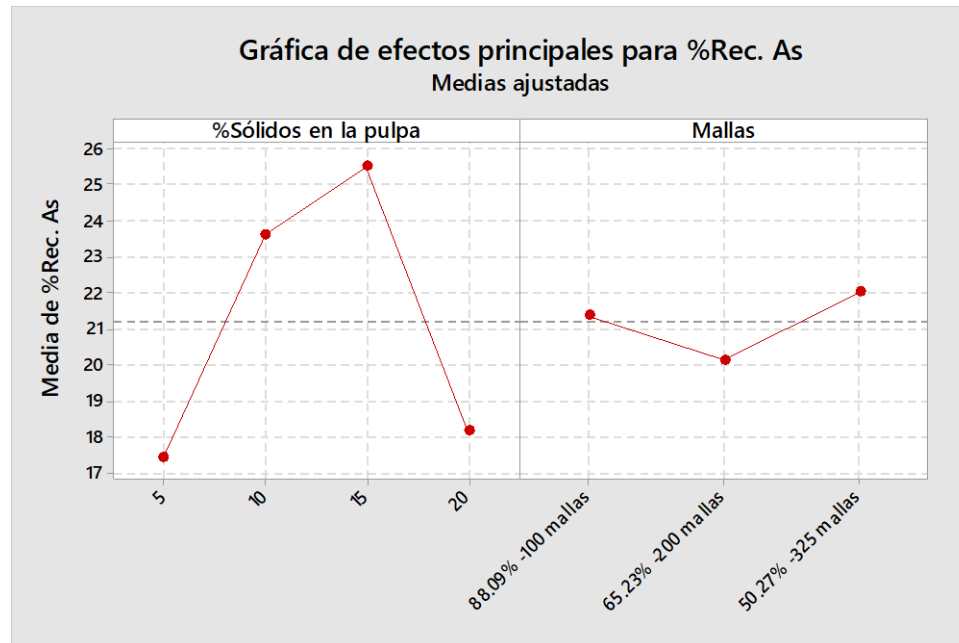


Figura N° 74. Efectos principales y su relación con el %Rec. Media de As

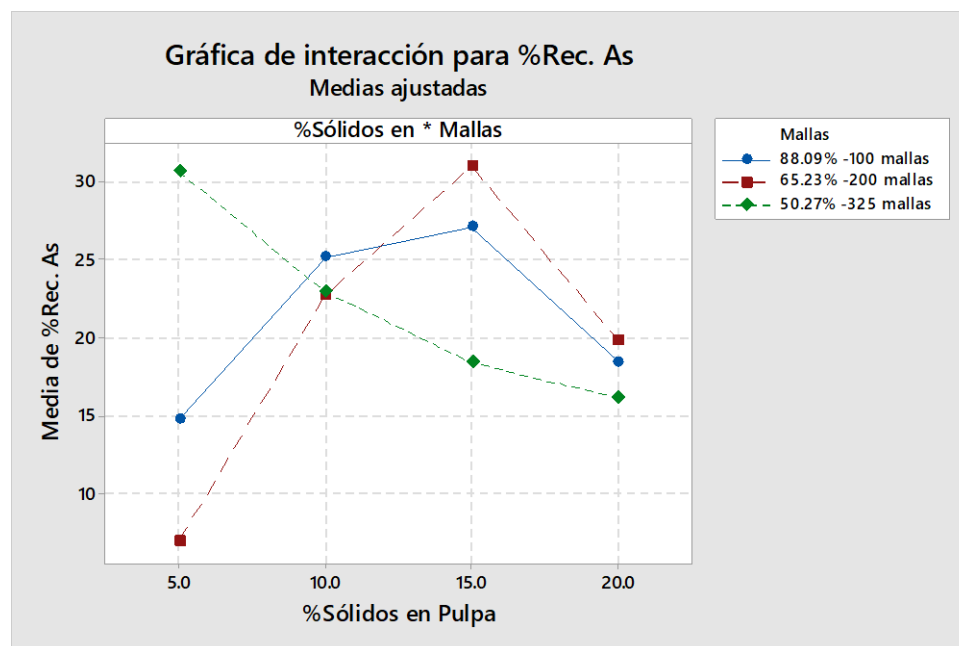


Figura N° 75. Interacción de las variables independientes y la Media de %Rec. de As

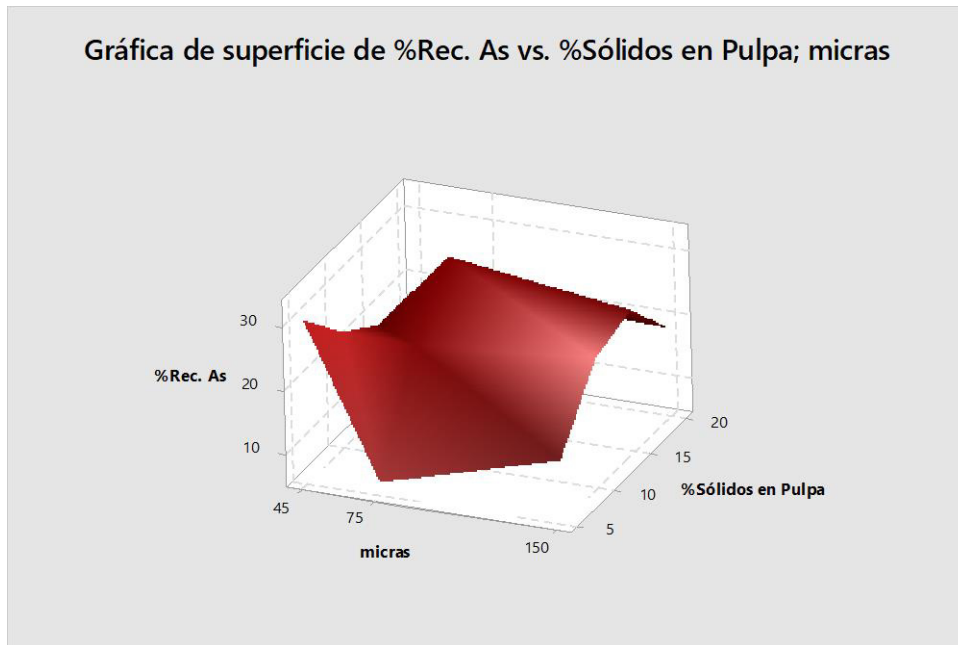


Figura N° 76. Superficie del %Rec. de As en función al %Sólidos en la pulpa y la granulometría (Mallas).

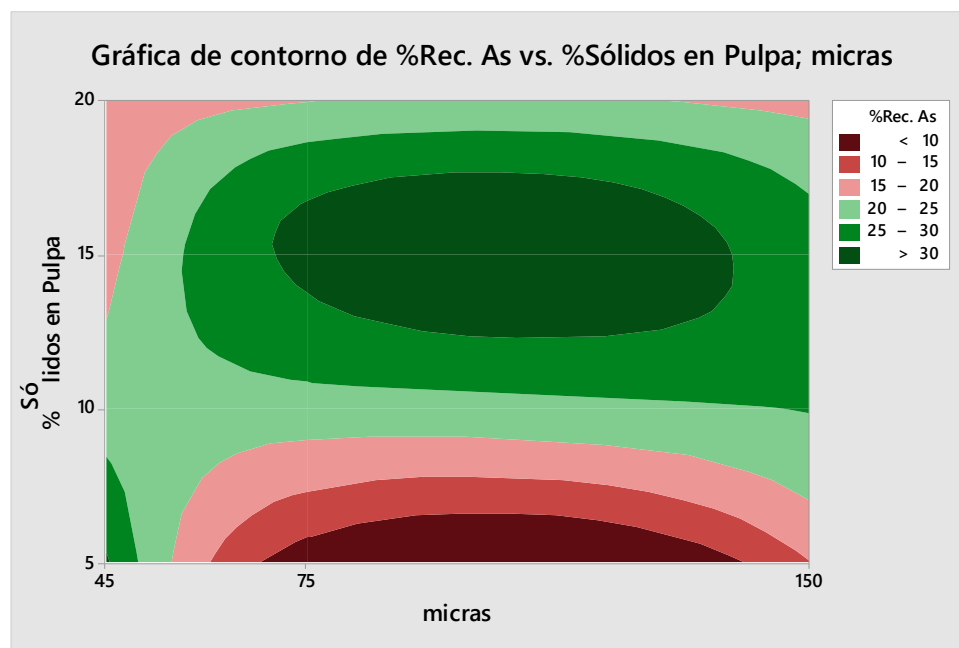


Figura N° 77. Superficie del %Rec. de As en función a las variables independientes desde la vista horizontal.

4.2 Recuperación de Oro en la Cianuración a partir del Sólido y del Postratamiento

Bacteriano



Figura N° 78. Shaker con las 6 muestras (4 pretratadas) cianurándose con aireación a 500 y 1000 ppm.
Fuente: Imagen tomada en el laboratorio de Biometalurgia



Figura N° 79. Imagen de todas las muestras (6) al término de las pruebas de cianuración listas para filtrar y analizar por oro y plata la solución por Absorción Atómica (AA) y determinar estos mismos metales en el relave mediante vía seca (Fire Assay).

Fuente: Imagen tomada en el laboratorio de Biometalurgia

4.2.1. Consumo de Reactivos en la Prueba de Cianuración.

En la prueba de cianuración se emplearon cal y cianuro de sodio, para acondicionar el medio y para lixiviar el oro ya parcialmente liberado en el pretratamiento. También se empleó

nitrate de plata e ioduro de potasio para calcular la reposición de cianuro en los tiempos indicados.

A continuación se mostrarán las tablas correspondientes a las 6 muestras cianuradas y se tomó como consumo, ya que se hizo por duplicado la corrida, el valor promedio de los reactivos líneas arriba indicados. Se especificó que se trabajó a 25% Sólidos (120 mL).

Tabla 67

Consumo de los reactivos usados en la prueba de cianuración de la muestra nro. 1

	Horas	Titulación (mL)	Libre (ppm)		Agregado (g)		Acumulado (g)	
		AgNO ₃	F NaCN	F CN ⁻	CaO	NaCN	CaO	NaCN
Nro. 1	0	0	1885	1000	1.183	0.226	1.183	0.226
	4	1.7	390	207	0.002	0.179	1.185	0.406
	12	4.1	940	499	0.002	0.113	1.186	0.519
	24	5.7	1306	693	0.002	0.069	1.188	0.589
	36	1.9	435	231	0.002	0.174	1.189	0.763
	48	2.9	665	353	0.002	0.146	1.191	0.909
TOTAL					1.191	0.909		

Nota: La metodología para la reposición de cianuro en base al consumo de nitrato de plata en la titulación en las horas indicadas están presentes en el Anexo.

Tabla 68

Consumo de los reactivos usados en la prueba de cianuración de la muestra nro. 2

	Horas	Titulación (mL)	Libre (ppm)		Agregado (g)		Acumulado (g)	
		AgNO ₃	F NaCN	F CN ⁻	CaO	NaCN	CaO	NaCN
Nro. 2	0	0	943	500	1.183	0.113	1.183	0.113
	4	0.9	206	109	0.026	0.088	1.209	0.201
	12	1.4	321	170	0.052	0.075	1.260	0.276
	24	2.4	550	292	0.060	0.047	1.320	0.323
	36	0.5	115	61	0.152	0.099	1.471	0.423
	48	1.5	344	182	0.102	0.072	1.573	0.494
TOTAL					1.573	0.494		

Tabla 69

Consumo de los reactivos usados en la prueba de cianuración de la muestra nro. 3

	Horas	Titulación	Libre		Agregado		Acumulado	
		(mL)	F NaCN	F CN ⁻	CaO	NaCN	CaO	NaCN
Nro. 3	0	0	1885	1000	1.258	0.226	1.258	0.226
	4	0.3	69	36	0.317	0.218	1.575	0.444
	12	0.7	160	85	0.195	0.207	1.769	0.651
	24	1.7	390	207	0.156	0.179	1.925	0.831
	36	0.4	92	49	0.212	0.215	2.136	1.046
	48	1.0	229	122	0.167	0.199	2.303	1.244
			TOTAL		2.303	1.244		

Tabla 70

Consumo de los reactivos usados en la prueba de cianuración de la muestra nro. 4

	Horas	Titulación	Libre		Agregado		Acumulado	
		(mL)	F NaCN	F CN ⁻	CaO	NaCN	CaO	NaCN
Nro. 4	0	0	943	500	1.258	0.113	1.258	0.113
	4	0.2	46	24	0.318	0.108	1.576	0.221
	12	0.4	92	49	0.182	0.102	1.757	0.323
	24	0.7	160	85	0.177	0.094	1.934	0.417
	36	0.2	46	24	0.202	0.108	2.135	0.524
	48	0.4	92	49	0.142	0.102	2.277	0.626
			TOTAL		2.277	0.626		

Tabla 71

Consumo de los reactivos usados en la prueba de cianuración de la muestra nro. 5

	Horas	Titulación	Libre		Agregado		Acumulado	
		(mL)	F NaCN	F CN ⁻	CaO	NaCN	CaO	NaCN
Nro. 5	0	0	943	500	0.806	0.113	0.806	0.113
	4	1.3	298	158	0.002	0.077	0.808	0.190
	12	1.5	344	182	0.002	0.072	0.809	0.262
	24	1.5	344	182	0.002	0.072	0.811	0.334
	36	0.8	183	97	0.162	0.091	0.972	0.425
	48	2.7	619	328	0.152	0.039	1.124	0.464
			TOTAL		1.124	0.464		

Tabla 72

Consumo de los reactivos usados en la prueba de cianuración de la muestra nro. 6

	Horas	Titulación	Libre		Agregado		Acumulado	
		(mL)	F NaCN	F CN ⁻	CaO	NaCN	CaO	NaCN
Nro. 6	0	0	1885	1000	0.806	0.226	0.806	0.226
	4	1.8	413	219	0.002	0.177	0.808	0.403
	12	3.0	688	365	0.002	0.144	0.809	0.547
	24	4.4	1008	535	0.002	0.105	0.811	0.652
	36	2.3	527	280	0.102	0.163	0.912	0.815
	48	4.0	917	486	0.056	0.116	0.968	0.931
			TOTAL		0.968	0.931		

Tabla 73

Resumen del consumo de cal y cianuro en las pruebas de cianuración tomando como media los resultados de la réplica

	Mallas	Pretratamiento	CaO acum. (g)	CaO acum. (g/mL)	NaCN acum. (g)	NaCN acum. (g/mL)
Nro. 1	65.23% -200 mallas	Sí	1.191	0.010	0.909	0.008
Nro. 2	65.23% -200 mallas	Sí	1.573	0.013	0.494	0.004
Nro. 3	50.27% -325 mallas	Sí	2.303	0.019	1.244	0.010
Nro. 4	50.27% -325 mallas	Sí	2.277	0.019	0.626	0.005
Nro. 5	65.23% -200 mallas	No	1.124	0.009	0.464	0.004
Nro. 6	65.23% -200 mallas	No	0.968	0.008	0.931	0.008

Nota: La muestra Nro. 3 fue la que tuvo el mayor consumo de cal y cianuro, siendo en esta malla la más óptima disolución de hierro en el pretratamiento.

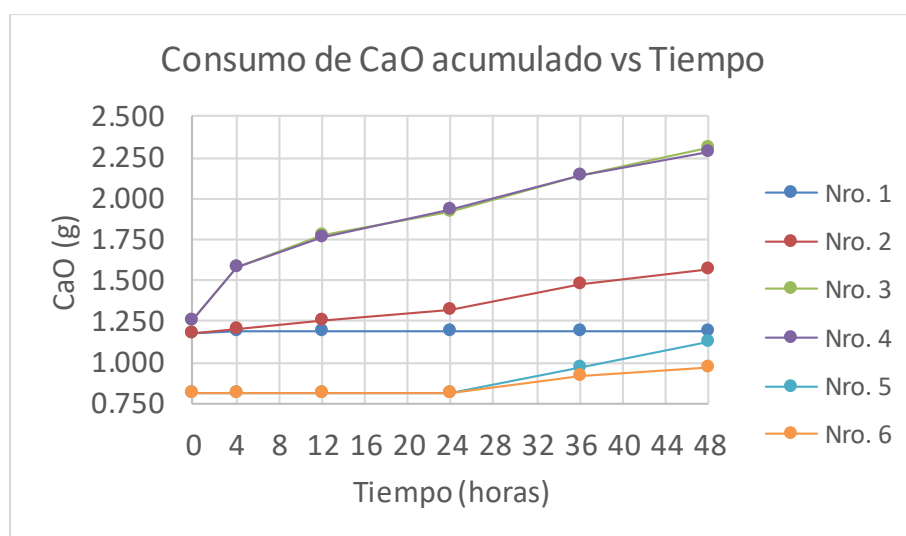


Figura N° 80. Representación gráfica del consumo acumulado de CaO empleado en la prueba de cianuración de todas las muestras (6).

Las muestras Nro. 1 y 3 tienen resultados similares punto a punto, es por ello la aparente superposición de curvas (verde claro y púrpura)

Fuente: Elaborado usando Excel 2013

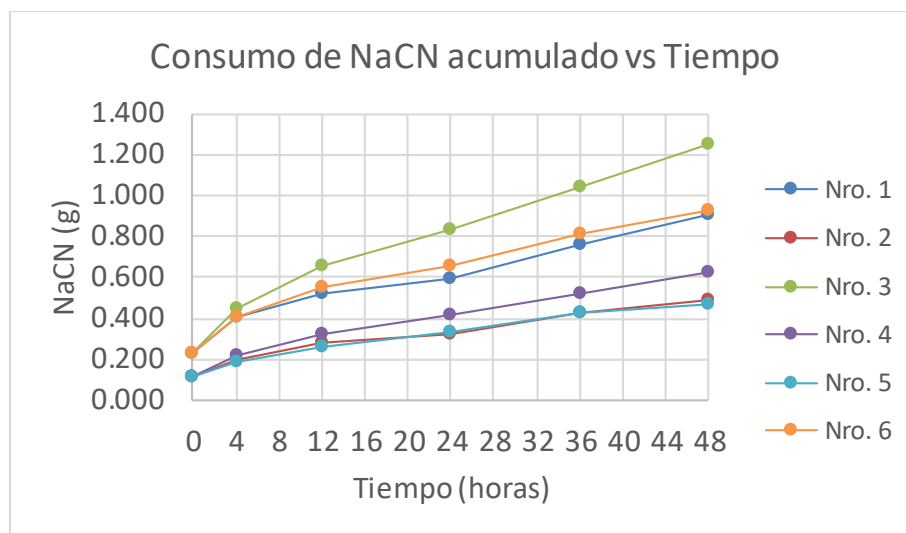


Figura N° 81. Representación gráfica del consumo acumulado de NaCN empleado en la prueba de cianuración de todas las muestras (6).

Las muestras Nro. 5 y 6 tienen resultados similares punto a punto, es por ello la aparente suposición de curvas.

4.2.2. Resultados de las Pruebas de Cianuración.

Al término de las pruebas de cianuración, se decantó y filtró alícuotas para el análisis por absorción atómica con las lámparas de Au y Ag en el laboratorio de análisis químico en la EP de Ingeniería Metalúrgica, UNMSM. En simultáneo se secó los residuos y se mandó a determinación de oro por vía seca al laboratorio H&FLABORATORIOS S.A.C. para saber las leyes del residuo sólido en Au y Ag. Se realizó las pruebas en duplicado.

Tabla 74

Resultados de las pruebas de cianuración de las muestras pretratadas (1, 2, 3 y 4) y las sin pretratamiento (5 y 6)

Nro.	Mallas	Pretratamiento	Fuerza de cianuro (ppm)	%Recuperación promedio de Au	%Recuperación promedio de Ag
1	65.23% -200 mallas	Sí	1000	71.93%	33.93%
2	65.23% -200 mallas	Sí	500	69.91%	20.12%
3	50.27% -325 mallas	Sí	1000	85.48%	37.89%
4	50.27% -325 mallas	Sí	500	83.40%	35.71%
5	65.23% -200 mallas	No	500	53.12%	9.85%
6	65.23% -200 mallas	No	1000	59.58%	13.80%

Nota: Las recuperaciones estimadas en función a las soluciones (análisis por vía húmeda) y al residuo sólido (análisis por vía seca) dan los mismos resultados. Se resalta la recuperación más alta. La plata se encuentra principalmente en la tenanita.

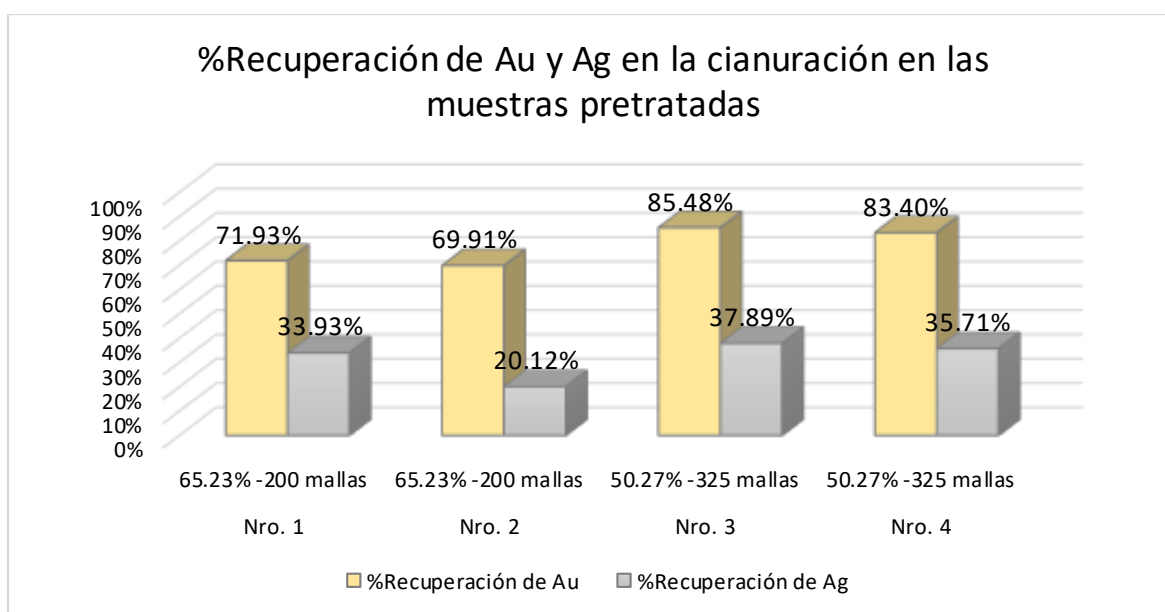


Figura N° 82. Diagrama de barras de las recuperaciones de oro y plata en la cianuración solo en las muestras con pretratamiento.

Fuente: Elaborado propia usando Excel 2013

4.2.3. Diseño Experimental en la prueba de Cianuración.

4.2.3.1. Diseño Experimental Factorial Simple de 2^2 para el Porcentaje de

Recuperación de Oro en Solución al Final de la Prueba de Postratamiento.

Tabla 75

Resultados en el porcentaje de recuperación de oro por duplicado

Mallas	Pretratamiento	Fuerza del cianuro	%Rec. Au ¹	%Rec. Au ²
65.23% -200 mallas*	No	500	52.57%	53.67%
65.23% -200 mallas	Sí	500	71.01%	68.81%
50.27% -325 mallas	Sí	500	82.85%	83.95%
65.23% -200 mallas*	No	1000	59.78%	59.38%
65.23% -200 mallas	Sí	1000	71.53%	72.33%
50.27% -325 mallas	Sí	1000	85.68%	85.28%

Nota: *Muestras de cabeza sin pretratamiento bacteriano.

Tabla 76

Resumen del Diseño para el DOE con %Rec. de Au en solución como respuesta

Factores:	2	Diseño de la base:	2; 4
Corridas:	8	Réplicas:	2
Bloques:	1	Puntos centrales (total):	0

Tabla 77

Información del Factor

Factor	Niveles	Valores
Fuerza del Cianuro	2	500; 1000
Mallas	2	65.23% -200 mallas 50.27% -325 mallas

En la siguiente tabla, la columna OrdenCorrida (C2) indica el orden de recolección de los datos. Si no aleatoriza el diseño, las columnas OrdenEstándar (C1) y OrdenCorrida (C2) son iguales. Como no se agregó puntos centrales ni colocó las corridas en bloques, Minitab 18

estableció todos los valores de C3 y C4 en 1. Los factores que ingresó se almacenan en las columnas C5 (Fuerza del Cianuro) y C6 (Mallas).

Tabla 78

Estructura de los ensayos para la recuperación de Au al final de la prueba de cianuración

OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	Fuerza del Cianuro	Mallas	%Rec. Au
1	1	1	1	500	65.23% -200 mallas	71.01
2	2	1	1	1000	65.23% -200 mallas	71.53
3	3	1	1	500	50.27% -325 mallas	82.85
4	4	1	1	1000	50.27% -325 mallas	85.68
5	5	1	1	500	65.23% -200 mallas	68.81
6	6	1	1	1000	65.23% -200 mallas	72.33
7	7	1	1	500	50.27% -325 mallas	83.95
8	8	1	1	1000	50.27% -325 mallas	85.28

4.2.3.1.1. Análisis de Varianza (ANOVA) para el %Rec. Au como respuesta.

Se decidió considerar solo el efecto de Fuerza de Cianuro y Mallas, ya que el efecto del producto de ambos (Fuerza del Cianuro* Mallas) no era significativo según el ANOVA ($p > 0.05$) para la recuperación de oro. Así que se corrió un nuevo ANOVA sin la inclusión de ese producto de variables.

Tabla 79

ANOVA considerando como variable el producto de las dos variables para el %Rec. de Au

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	373.988	124.663	145.59	0.000
Lineal	2	373.986	186.993	218.39	0.000
Fuerza del Cianuro	1	8.405	8.405	9.82	0.035
Mallas	1	365.581	365.581	426.96	0.000
Interacciones de 2 términos	1	0.002	0.002	0.00	0.966
Fuerza del Cianuro*Mallas	1	0.002	0.002	0.00	0.966
Error	4	3.425	0.856		
Total	7	377.413			

Nota: El efecto de la interacción de los 2 términos es mayor al valor del nivel de significancia 0.05, P-Values (columna p), este está sombreados en la tabla.

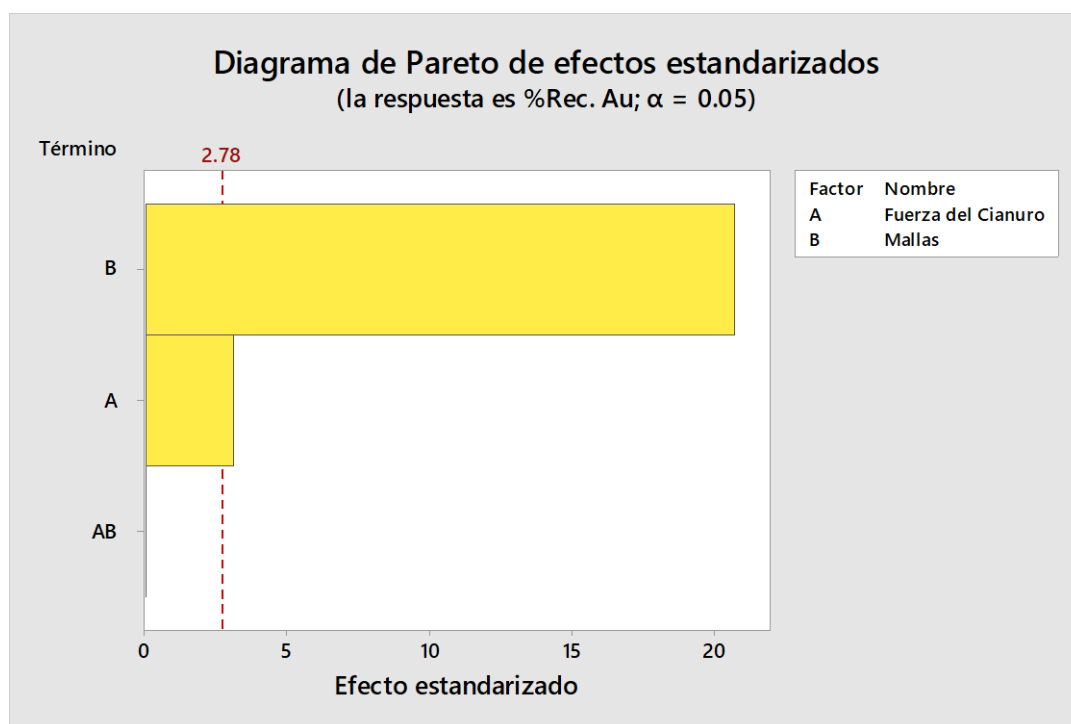


Figura N° 83. Diagrama de Pareto de los efectos principales en función a la respuesta(%Rec. Au).

Nota: Efectos por encima del valor de 2.78 son efectos significativos.

Fuente: Elaborado usando Minitab 18

Tabla 80

ANOVA sin considerar el producto de las dos variables para el %Rec. de Au

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	2	373.986	186.993	272.84	0.000
Lineal	2	373.986	186.993	272.84	0.000
Fuerza del Cianuro	1	8.405	8.405	12.26	0.017
Mallas	1	365.581	365.581	533.41	0.000
Error	5	3.427	0.685		
Falta de Ajuste	1	0.002	0.002	0.00	0.966
Error Puro	4	3.425	0.856		
Total	7	377.413			

Nota: Los efectos principales son los menores al nivel de significancia 0.05, P-Values (columna p), estos están resaltados en la tabla.

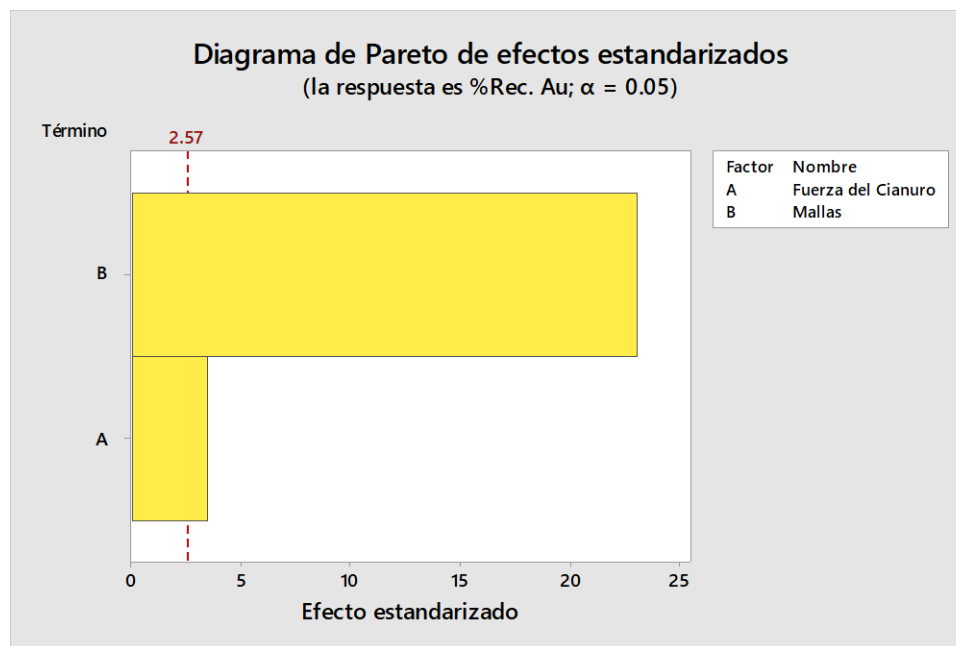


Figura N° 84. Diagrama de Pareto de los efectos principales, sin considerar el efecto del producto de los dos términos, en función a la respuesta (%Rec. Au).

Nota: Efectos por encima del valor de 2.78 son efectos significativos.

Tabla 81
Resumen del Modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.827865	99.09%	98.73%	97.68%

“S” simboliza la desviación estándar de la distancia entre los valores de datos y los valores ajustados. Esta respuesta nos indica que la desviación estándar es 0.827865 (de los puntos de datos alrededor de los valores ajustados), siendo mucho menor a la desviación estándar del modelo de la recuperación de fierro y arsénico en el pretratamiento, por tratarse de un diseño experimental más simple.

El “R- cuad.” indica, en este caso, un favorable ajuste del modelo a los datos.

El “R- cuad. (ajustado)” se representa en porcentaje indicándonos la variación en la respuesta explicada por el modelo, siendo ajustado para el número de predictores al número de observaciones en el modelo relativo.

Se utiliza la simbología “R- cuad. (pred)” o “R- cuad. pronosticado” para establecer si el modelo logra predecir bien la respuesta ante las observaciones futuras.

Ante un R- cuad. (pred) mayor o más grande, los modelos son mejor capaces de predecir. Para 97.68% de R- cuad. (pred) se puede decir que está ligeramente sobre ajustado ya que el valor de 99.09% de R- cuad. es un poco mayor. Pero el presente modelo de recuperación de oro como respuesta en este diseño factorial es mucho más confiable estadísticamente que el modelo de fierro y arsénico en el pretratamiento.

No se incluyó tabla de ajustes y diagnósticos (observaciones no comunes), ya que los valores no son atípicos y siguen adecuadamente la ecuación de regresión propuesta.

4.2.3.1.2. Ecuación de regresión en las distintas Mallas para el %Rec. de Au.

Debido a que la interacción de las variables Fuerza del Cianuro y Mallas dan como consecuencia una tercera variable a considerar (Fuerza del Cianuro* Mallas), el “p” de esta es mayor a 0.05 (ver [Tabla 79](#)). Se concluye que estas 2 variables solo participarán en el modelo de la ecuación independientemente entre sí y no como una tercera variable obtenida del producto. Se efectuará esta interacción como regresión lineal ya que hay 2 puntos en cada malla (dependientes entre sí) con su respectiva prueba en duplicado y será representada en gráfica de dispersión con grupos.

1) Ajuste de Regresión Lineal en 50.27% -325 mallas:

R- cuad. = 86.3%

$$\% \text{Rec. Au} = 81.365 + 0.00410 * \text{Fuerza del Cianuro} \quad (\text{Ec. 36})$$

2) Ajuste de Regresión Lineal en 65.23% -200 mallas:

R- cuad. = 59.8%

$$\% \text{Rec. Au} = 67.845 + 0.004040 * \text{Fuerza del Cianuro} \quad (\text{Ec.37})$$

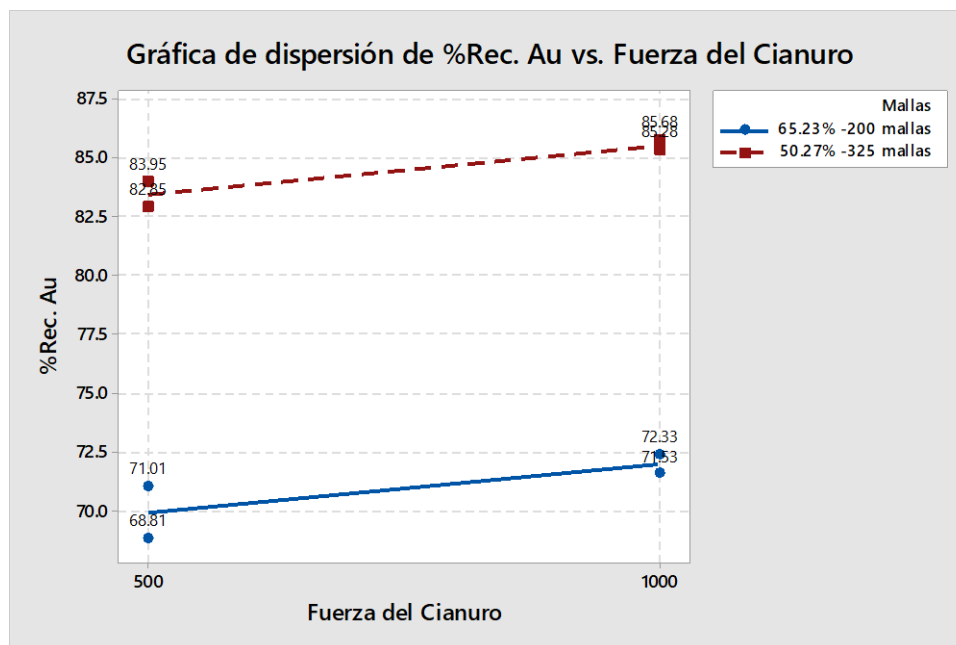


Figura N° 85. Gráfica de dispersión del porcentaje de recuperación de oro en función a la fuerza del cianuro agrupado en mallas.
Regresiones lineales dependientes entre sí. Siendo el %Rec. Au (variable dependiente), Fuerza del Cianuro y Mallas (variables independientes).

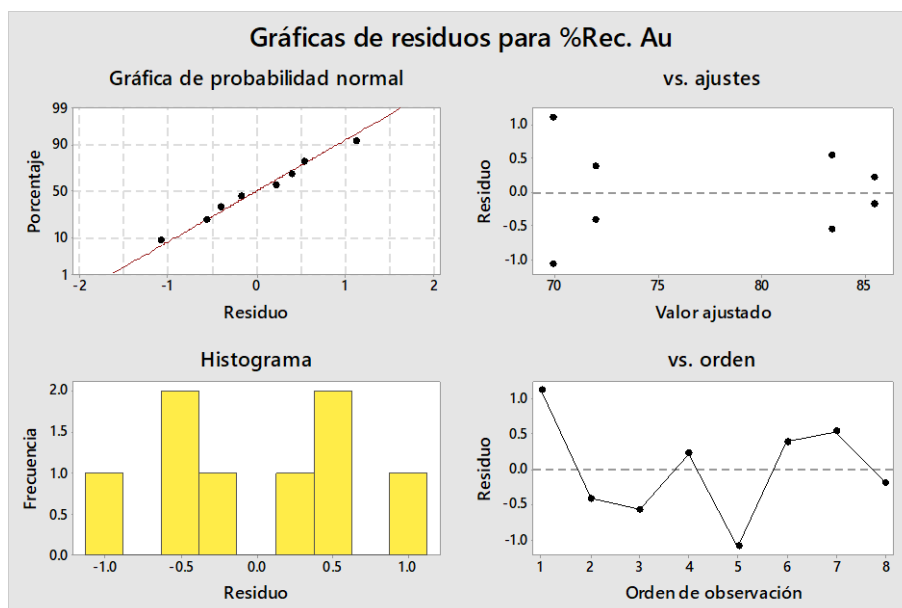


Figura N° 86. Gráfica de Residuos 4 en 1 en función a la respuesta (%Rec. Au).
Nota: No hay puntos alejados, no hay una distribución con valores atípicos. Histograma de Doble pico o Distribución bimodal. En general, un Histograma de Doble pico sugiere la existencia de datos de dos procesos diferentes, debido a la diferencia muy significativa en la recuperación de oro poscianuración entre las distintas mallas (ver gráfica. Residuo vs Valor ajustado).

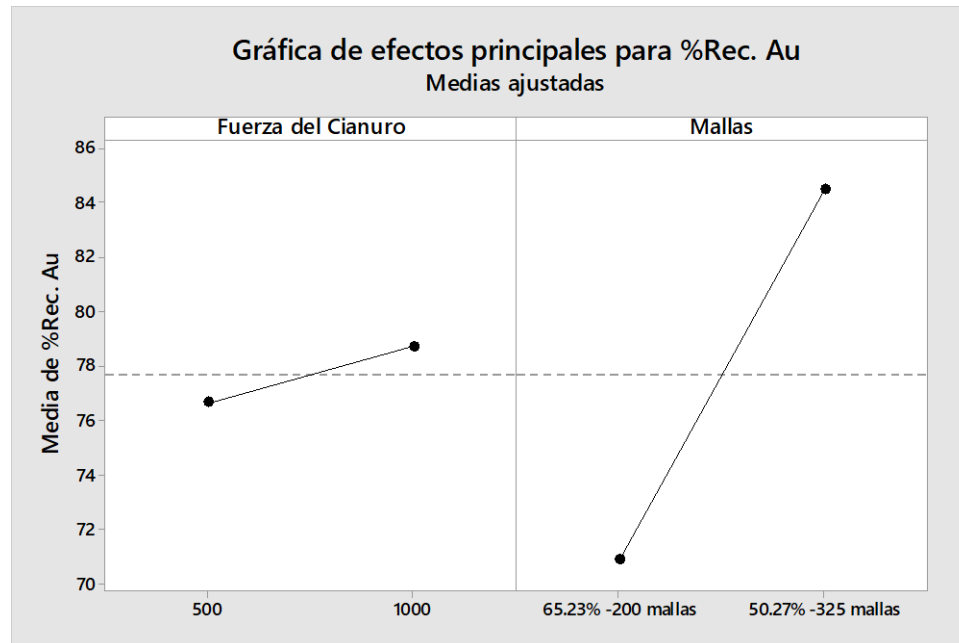


Figura N° 87. Efectos principales y su relación con el %Rec. Media de Au.

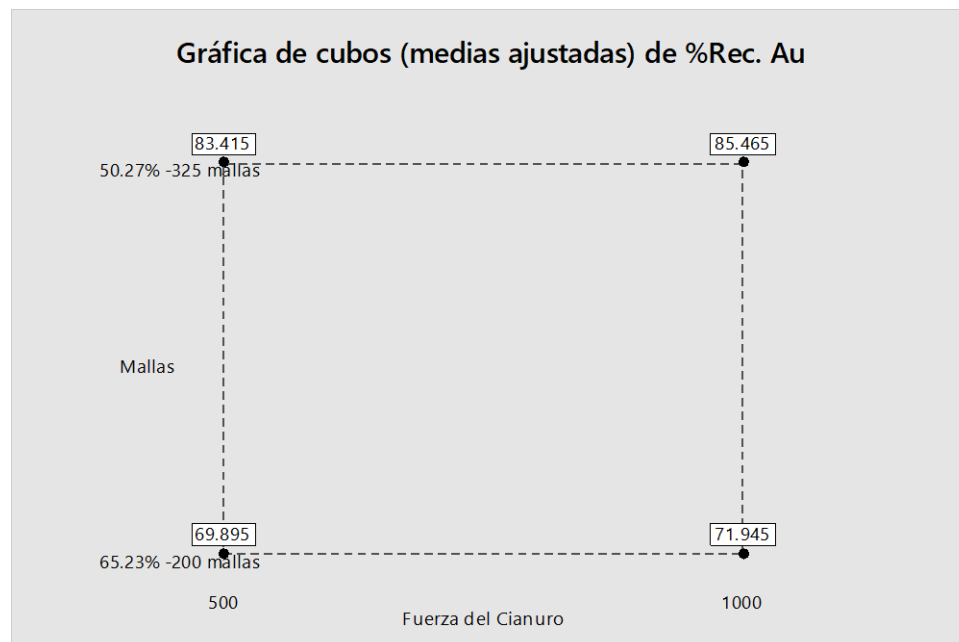


Figura N° 88. Gráfica de cubos elaborada a partir de las variables independientes y tomando como respuesta la media de los datos en la recuperación de oro en solución al final de la prueba de cianuración.
Nota: El valor óptimo se encontraría en el lado superior derecho.

CAPÍTULO V

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

5.1 Contraste de los Resultados con la Hipótesis

Se cumplió con la hipótesis del presente trabajo de investigación. En base al pretratamiento y la disolución del fierro, se logró degradar la matriz aurífera refractaria compuesta de pirita. Las principales fuentes de fierro fueron la pirita y la arsenopirita (aproximadamente un 60% en volumen de composición de estos dos minerales en la muestra). El tiempo total del pretratamiento fue de 12 días, pero en las muestras de granulometría más fina, ya en los primeros 8 días, se había logrado recuperar más del 90% de todo el fierro que se pudo solubilizar con el pretratamiento.

El cumplimiento de la hipótesis también se ve reflejada con el tratamiento de cianuración de la muestra como postratamiento, ya que se obtuvieron mayores recuperaciones en oro a diferencia de las muestras de cabeza sin un pretratamiento bacteriano.

5.2 Contraste de los Resultados con Otros Estudios

1. En el estudio realizado por Katherine Jaramillo y Paulina Aguirre (Jaramillo & Aguirre, 2014), “Influencia de los parámetros de agitación y aireación en la biooxidación de un mineral aurífero refractario” se detalla lo siguiente:

Una de las conclusiones fue el porcentaje en la recuperación de oro después de la cianuración, siendo un 83.63% luego del pretratamiento de biooxidación bajo

condiciones de aireación. Se debe considerar que su muestra tenía distinta ley de fierro y oro en la cabeza comparando al del presente estudio de investigación, un tamaño de partícula menor a -200 mallas, 15% en porcentaje de sólidos en la pulpa, un 2% de ion ferroso en el 9K y un tiempo de duración de 30 días del pretratamiento.

En el presente trabajo de investigación se logró reducir el tiempo a 12 días, y a condiciones similares a excepción del valor de 5% en vez de 15% en el porcentaje de sólidos en la pulpa, la diferente ley de cabeza, y la ausencia del ion fierro en el 9K como medio líquido en nuestra muestra, se logró obtener una recuperación de 85.48% en oro después de la cianuración.

2. En el estudio realizado por un conjunto de investigadores siendo uno de ellos Juan David Ospina (Ospina, Mejía Restrepo, Osorno Bedoya, Márquez, & Morales, 2012), “Biooxidación de concentrados de arsenopirita por *Acidithiobacillus ferrooxidans* en Erlenmeyer agitados”

Una de las conclusiones importantes se da a conocer al finalizar las pruebas después de 30 días. La concentración de arsénico para la malla Tyler 200 fue de 7550 mg.L⁻¹, lo que implica un 18,7% del total de arsénico lixiviable, y para la malla Tyler 325 fue de 2850 mg.L⁻¹, es decir un 7,1% del arsénico total lixiviable.

En el presente trabajo de investigación, que concluyó en 12 días, se detalla que para la malla Tyler 200 el mejor valor en la recuperación de arsénico fue de 5431 mg.L⁻¹, lo que implica un 32.85% del total de arsénico lixiviable y para la malla Tyler 325 el mejor valor fue de 1605 mg.L⁻¹, es decir un 30.83% del arsénico total lixiviable. Llegando a la misma conclusión en cuanto a las mallas en estudio en la biolixiviación de la arsenopirita: “Por lo tanto, el tamaño de partícula jugó un papel fundamental en la cinética de adaptación de los microorganismos, sugiriendo que a menor tamaño del sustrato empleado mayor dificultad se le presenta al microorganismo para oxidar el mineral con contenido de arsénico”.

3. En el estudio realizado por Delia Ho Lock (Ho Lock, 2004), “Aplicaciones en la biometalurgia” se detalla lo siguiente:

Una de las conclusiones más importantes es que en dicho estudio se resalta el papel fundamental de las concentraciones de fierro y arsénico en la biolixiviación, ya que se trató también con un mineral aurífero refractario. Concluyendo una disolución del fierro en 74% y del 100% del arsénico, muestra a una granulometría del 80% -150 mallas, en un periodo de 90 días.

En el presente trabajo de investigación se tuvo como variables dependientes el fierro y el arsénico, ya que al presentar oro en la matriz de pirita y haber presencia abundante de arsenopirita, era necesario la disolución en simultáneo de estos minerales, siendo este último mineral también importante ya que su oxidación incrementaba la concentración en fierro y arsénico en solución (ver [Biolixiviación de Arsenopirita](#), Ec.10 y Ec. 11). Las recuperaciones en promedio más importantes fueron del 44.29% de fierro y del 31.05% de arsénico a diferentes granulometrías, 50.27% -325 mallas y 65.23% -200 mallas respectivamente, pero en un periodo de 12 días.

4. En otras tesis de pregrado revisadas, (Ramírez Oscco, 2015) y (Cayo Gonzáles, 2016), con un pretratamiento bacteriano con *Acidithiobacillus ferroxidans* y posterior cianuración, se obtuvo la recuperación en oro del 26.69% (24 días de pretratamiento) y 60.29% (14 días de pretratamiento), respectivamente.

En el presente trabajo de investigación, en la etapa de pretratamiento, partiendo de un tiempo óptimo en la recuperación de fierro (12 días) y al suministrar aire en cada prueba se logró una recuperación óptima del 85.48% en oro, después de cianurar. Pese a tener diferentes variables, pero similar caracterización mineralógica de las muestras en los estudios de cada

trabajo de investigación, se obtuvieron resultados positivos en el pretratamiento y esto se contrastaba con la recuperación de oro en la cianuración.

5.3 Conclusiones

En función a las pruebas realizadas y la interpretación del diseño experimental, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. En el pretratamiento, las variables con coeficientes más significativas fueron: El % de sólidos x Mallas, granulometría (mallas) y %Sólidos en la pulpa, en ese orden (de mayor a menor importancia), siendo las muestras pretratadas con aireación (30 L/h) las que obtuvieron mejores resultados a diferencia de las que no.
2. En un tiempo de 12 días, dividido en 3 etapas de 4 días, la mejor respuesta en la recuperación promedio de Hierro fue de 44.29%, lográndose ello con 5% de sólidos en la pulpa a 50.27% - 325 mallas.
3. En un tiempo de 12 días, dividido en 3 etapas de 4 días, la mejor respuesta en la recuperación promedio de arsénico fue de 31.05%, lográndose ello con 15% de sólidos en la pulpa a 65.23% -200 mallas.
4. En la granulometría más fina (50.27% -325 mallas), el porcentaje de recuperación de hierro y el oxígeno en solución mantuvieron una relación inversamente proporcional, solo en la primera etapa; pero, directamente proporcional con el Potencial de Óxido Reducción y el número de células en todas sus etapas.
5. En el postratamiento de cianuración, las variables Fuerza del cianuro y Mallas tienen efectos estadísticamente significativos, excepto en la interacción Fuerza del cianuro x Mallas; poseen mayor influencia en la recuperación de oro cuando ambas trabajan independientemente y siendo la fundamental la granulometría.

6. En la cianuración, la mejor respuesta fue de 85.48% de Au y de 37.89% de Ag en cuanto al porcentaje de recuperación promedio, lográndose dicha recuperación de oro en la malla más fina (50.27% -325 mallas).

6. Recomendaciones

Desde el punto de vista metodológico, académico y práctico aplicado en el presente trabajo de investigación, se enumeran las siguientes recomendaciones:

1. Al ser las condiciones de aireación favorables en la biooxidación del oro, se recomienda un estudio a profundidad de la cinética de solubilidad de los metales a distintos caudales del aire suministrado, presiones y diseño del recipiente que contiene la pulpa. Así mismo realizar pruebas a escala piloto, con el fin de comparar los resultados obtenidos y plantear la implementación a una escala mayor.
2. Ya identificadas las interacciones significativas en la recuperación metálica entre las variables independientes, se recomiendan nuevos modelos de diseño experimental para la optimización como el de superficie de respuesta.
3. Al realizarse las pruebas de adaptación bacteriana, es imperativo la supervisión del proceso permanentemente, en especial los primeros días, ya que es crítico en ese tiempo la adición del ácido sulfúrico diluido para mantener un pH estable, más aún si la muestra está siendo aireada.
4. Para favorecer la oxidación del material, se recomienda el estudio con oxígeno y dióxido de carbono, siendo estos muy importantes en el metabolismo bacteriano, reflejándose en la disolución de los componentes de la muestra.

7. Bibliografía

Álvarez Osorio, E. (2017). *Estudio de la investigación metalúrgica para la recuperación de oro y plata a partir de minerales acopiados en la compañía minera Jerusalén S.A.C.*

Arequipa: Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería de procesos, Universidad Nacional de San Agustín. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/5338>

Álvarez Vásquez, C. (2015). *Diseño de planta de lixiviación en pila para la unidad de procesos hidrometalúrgicos. Codelco, división teniente.* (P. P. CIVIL, Ed.) Valparaíso:

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO, FACULTAD DE INGENIERÍA, ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA. Obtenido de <https://catalogo.pucv.cl/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=427613>

Arias Arce, V., Coronado Falcón, R., Puente Santibañez, L., & Lovera Dávila, D. (2005).

Refractariedad de concentrados auríferos. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG*, 8(16), 5-14. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v8i16.493>

Arias Arce, V., Lovera, D., Quiñones L., J., Flores P., A., Gil R., J., Ramírez, L., & Cayo, H.

(Julio- Diciembre de 2015). Biolixiviación de cobre a partir de minerales sulfurados con altos tenores de pirita y arsenopirita. (F. UNMSM, Ed.) *Rev. del Instituto de Investigación (RIIGEO)*, pp. 157- 164. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v18i36.12164>

Arias Arce, V., Rodríguez V., C., Ramírez R., P., Nonones V., E., Salazar I., D., Gil R., J., . . .

Jamanca L., G. (Julio- Diciembre de 2013). Aislamiento de bacterias acidófilas a partir del drenaje ácido proveniente de las inmediaciones a las unidades mineras Julcani y Recuperada, Huancavelica. *Rev. del Instituto de Investigación (RIIGEO)*, Vol. 15(Nº 30), pp. 59-66. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v15i30.3450>

- Arias Lafargue, T., Fernández Compta, D., Sánchez Rodríguez, Y., & Lasserra Portuondo, A. (2017). Influencia de la lixiviación en la recuperación de oro en la Mina Oro- Barita de Santiago de Cuba. *Facultad Ingeniería Química, Universidad de Oriente*. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852017000300008
- Astuhuamán Pardavé, A. R. (2009). *Estudio de parámetros en la lixiviación en pilas para optimizar la extracción de oro*. Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalurgista y de Materiales, FACULTAD DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ, Huancayo. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12894/2215>
- Azañero Ortiz, Á. (2013). *Guía de laboratorio de hidrometalurgia de los metales preciosos: Cianuración*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Dpto. de Ingeniería Metalúrgica- FIGMMG. Lima: Autoría del Ing. Ángel Azañero.
- Barreto Cuevas, L. (2016). *Microbiología Clínica*. Universidad Europea de Madrid. Madrid: © EDITORIAL SÍNTESIS, S. A. Obtenido de <https://www.sintesis.com/laboratorio%20c1%C3%ADnico%20y%20biom%C3%A9dico-261/microbiolog%C3%ADa%20cl%C3%ADnica-ebook-2137.html>
- Brierley, J. A. (2000). Expanding role of microbiology in metallurgical processes. *Mining Engineering*, 52: 20-24. Obtenido de <https://me.smenet.org/abstract.cfm?articleID=3752&page=20>
- Brierley, J. A., & Brierley, C. L. (2001). *Present and future commercial applications of biohydrometallurgy*. USA: Hydrometallurgy 59. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00162-6](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00162-6)

- Cardona Giraldo, E. (2015). *Microorganismos Potenciales degradadores de Cianuro en residuos de minería de oro*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/55922>
- Cayo Gonzáles, H. (2016). *Condiciones óptimas de lixiviación microbiana empleando Acidithiobacillus ferrooxidans como pretratamiento para la cianuración de mineral sulfurado aurífero*. Callao: EP de Ingeniería Química, UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12952/1785>
- Cisneros Berrocal, L. (1993). Lixiviación bacteriana del mineral de uranio del yacimiento Chapi Macusani - Puno. *División de Materias Primas del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN)*. Obtenido de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/2121>
- Codelco. (2018). *Codelco Educa*. (©. 2. reservados., Ed.) Obtenido de <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/biolixiviacion.html>
- Das, T., Ayyappan, S., & Chaudhury, G. R. (1999). Factors Affecting Bioleaching Kinetics of Sulfide Ores Using Acidophilic Microorganisms. *BioMetals*, 12, pp. 1- 10. <https://doi.org/10.1023/A:1009228210654>
- Deloya Martínez, A. (2012). Tratamiento de desechos del cianuro por biorremediación. (T. d. Centro de Investigación en Protección Ambiental, Ed.) *Tecnología en Marcha*, 25(2), 61-72. <https://doi.org/10.18845/tm.v25i2.317>
- Deveci, H. (2002). Effect of solids on viability of acidophilic bacteria. *Minerals Engineering*, 15, pp. 1181- 1189. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00267-4](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00267-4)

- Deveci, H. (2004). Effect of particle size and shape of solids on the viability of acidophilic bacteria during mixing in stirred tank reactors. *Hidrometallurgy*, 71, pp. 385- 396.
[https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(03\)00112-9](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00112-9)
- Ehrlich, H. L. (1997). *Technical potential for bioleaching and biobeneficiation of ores to recover base metals (other than iron or copper), platinum- group metals and silvers*, in: D. Rawlings (Ed.). New York: Biomining: Theory, Microbes and Industrial Processes, Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-06111-4_7
- Farroñay Yauri, C. F. (2011). *Biooxidación de concentrados refractarios de oro*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería. Obtenido de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/6370>
- Gómez, J., & Cantero, D. (2005). Biooxidación del ion ferroso. En: Fernando Acevedo y Juan Carlos Gentina (eds.). *Fundamentos y perspectivas de las tecnologías biomineras*, pp. 25-43. Obtenido de https://www.euv.cl/archivos_pdf/fundamentos_biomineras.pdf
- Grant, W. D., & Long, P. E. (1985). Environmental Microbiology. (O. (. Hutzinger, Ed.) Vol. 1(Part D: <<The Natural Environment and the biogeochemical cycles>>).
https://doi.org/10.1007/978-3-540-39209-5_4
- Grishin, S. I., & Tuovinen, H. H. (1988). Fast Kinetics of Fe²⁺ Oxidation in Packed- Bed Reactors. (A. S. Copyright©1988, Ed.) *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 54(Nro. 12), p. 3092-3100. <https://doi.org/10.1128/aem.54.12.3092-3100.1988>
- Gwénaëlle Guezennec, A., Archane, A., Ibarra, D., Jacob, J., & d'Hugues, P. (2016). *The use of oxygen instead of air in bioleaching operations at medium temperature*. Quebec: 28th

International Mineral Processing Congress. Obtenido de <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-01306179>

Harvey , P. I., & Crundwell, F. K. (1996). *The effect of As (III) on the growth of Thiobacillus ferrooxidans in an electrolytic cell under controlled redox potentials* (Vol. 9). Minerals Engineering. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(96\)00098-2](https://doi.org/10.1016/0892-6875(96)00098-2)

Ho Lock, D. (2004). Aplicaciones en biometalurgia. (S. I. Departamento de Ingeniería, Ed.) *Revista de Química*, 18(1), pag. 19- 22. Obtenido de <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/3453>

Hutchins, S. R., Davidson, M. S., Brierley , J. A., & Brierley , C. L. (1986). Microorganisms in Reclamation of Metals. *Annual Review of Microbiology*, 40, pp. 311- 336. <https://doi.org/10.1146/annurev.mi.40.100186.001523>

Iglesias, N., Carranza, F., & Palencia, I. (1998). *La biolixiviación como pretratamiento de menas auríferas refractarias en matriz de sulfuros*. (3. D. Rev. Metal. Madrid, Ed.) Sevilla, España: © Consejo Superior de Investigaciones Científicas. <https://doi.org/10.3989/revmetal.1998.v34.il.656>

insilico.ehu. (s.f.). Obtenido de http://insilico.ehu.es/camara_contaje/neubauer_improved.php

Jaramillo, K., & Aguirre, P. (2014). Influencia de los parámetros de agitación y aireación en la biooxidación de un mineral aurífero refractario. *"Excellence in Engineering To Enhance a Country's Productivity"*, 22- 24. Obtenido de <https://laccei.org/LACCEI2014-Guayaquil/RefereedPapers/RP091.pdf>

- Kelly, D. P., & Harrison, A. P. (1989). *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*. (M. P. J. T. Staley, Ed.) *vol. 3*, pp. 1842- 1858. Obtenido de <https://www.springer.com/gp/book/9780387950419>
- Laboratorio de Genómica Viral y Humana, Facultad de Medicina UASLP. (2008). *Conteo celular y evaluación de viabilidad*. Standard Operating Procedures (SOPs), Laboratorio de Genómica Viral y Humana, Facultad de Medicina UASLP. Obtenido de http://www.genomica.uaslp.mx/Protocolos/Cell_counts_SPA.pdf
- Lagos Miranda, C. (2009). *Biolixiviación: Desarrollo actual y sus expectativas*. (D. d. COCHILCO, Ed.) Chile: Registro de Propiedad Intelectual © N° 187.464. Obtenido de https://library.co/document/yer86r0q-biolixiviacion-desarrollo-actual-y-sus-expectativas-de.html?utm_source=search_v3
- Logsdon, M. J., Hagelestein, K., & Mudder, T. I. (2001). *The Management of Cyanide in Gold Extraction*. Ottawa, Ontario: The International Council on Metals and the Environment. <https://doi.org/10.1080/13895260008953333>
- Ly Arrascue, M. E. (2006). *Biooxidation of arsenopyrite concentrate using BIOX® process: Industrial experience in Tamboraque, Peru*. *Article Hydrometallurgy* 83(1): 90-96. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.03.050>
- Makita, M. (2004). *Biolixiviación de Metales en Minerales con Arsenopirita Mediante Cepas de Acidithiobacillus ferrooxidans en Cultivo Continuo*. Chihuahua. Obtenido de <http://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/58>

- Malatt, K. A. (1999). Bacterial oxidation of pure arsenopyrite by a mixed culture. (A. B. In: R. Amlis, Ed.) *Biohydrometallurgy and the Environment toward the Mining of the 21st Century*, Part A:411-421. [https://doi.org/10.1016/S1572-4409\(99\)80042-X](https://doi.org/10.1016/S1572-4409(99)80042-X)
- Marsden, J., & House, I. (1992). *The chemistry of the gold extraction (2nd edition)*. Colorado, USA: Gold Bull. <https://doi.org/10.1007/BF03215543>
- McCready, R. G., & Gould, W. D. (1990). *Bioleaching of uranium*, in: H.L. Ehrlich, C.L. Brierley (Eds.), *Microbial Mineral Recovery*, McGraw-Hill. New York, EEUU. <https://doi.org/10.7844/kirr.2011.20.2.030>
- Mejía, E., Ospina, J. D., Osorno, B. L., Márquez, M. A., & Morales, A. L. (2011). Adaptation of a strain *Acidithiobacillus ferrooxidans* compatible on concentrates of chalcopyrite (CuFeS_2), sphalerite (ZnS) and galena (PbS). *Rev. Colomb. Biotecnol.*, XIII(1), pp. 132-143. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77621348018>
- Misari, F. (2016). *BIOLIXIVIACIÓN, Tecnología de la Lixiviación Bacteriana de Minerales*. Lima: © Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería, Osinergmin. Obtenido de https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documento/mineria/Documentos/Publicaciones/Biolixiviacion.pdf
- Monroy, M. G., Mustin, C., de Donato, P., Barres, O., Marion, P., & Berthelin, J. (1995). Occurrences at mineral-bacteria interface during oxidation of arsenopyrite by *Thiobacillus ferrooxidans*. *Biotechnology and Bioengineering*, 46, pp. 13- 21. <https://doi.org/10.1002/bit.260460103>

- Muñoz Portero, M. J. (2001). Construcción de los diagramas de Pourbaix para los sistemas metal-agua. (s. .: Ingeniería, Ed.) Obtenido de <http://hdl.handle.net/10251/13709>
- Muñoz, J. A., Gonzáles, F., Blázquez, M. L., & Ballester, A. (1995). A study of the bioleaching of a Spanish uranium ore. Part I: A review of the bacterial leaching in the treatment of uranium ores. *Hydrometallurgy*, 38, pp. 39-57. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(94\)00039-6](https://doi.org/10.1016/0304-386X(94)00039-6)
- Norris, P. R. (1990). Microbial Mineral Recovery. (M. H. H.L. Ehrlich y C.L. Brierley (Eds.), Ed.) pp. 3-16. Obtenido de <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19921373103>
- Ospina, J. D., Mejía Restrepo, E., Osorno Bedoya, L., Márquez, M. A., & Morales, Á. L. (julio de 2012). Biooxidación de concentrados de arsenopirita por *Acidithiobacillus ferrooxidans* en erlenmeyer agitados. (G. d. Bravo, Ed.) *Rev. Colomb. Biotecnol.*, Vol. XIV(No. 1), 135- 145. Obtenido de <https://www.redalyc.org/comocitar.oa?id=77624081012>
- Oyarce Guarniz, E. J., & Lescano Terán, M. A. (2015). *Proceso de lixiviación a nivel artesanal para la obtención de los parámetros óptimos en la recuperación de plata y oro en el distrito de Siembrón de la provincia de Gran Chimú*. Trujillo, Perú: Biblioteca Digital-Dirección de Sistemas de Informática y comunicación. Obtenido de <https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/3633>
- Palacios, Gallegos, & Bernedo. (2002). *Workshop Práctico del Oro*. INEA.

- Prada Fonseca, M., Caicedo Pineda, G., & Márquez Godoy, M. (2016). Comparación del potencial oxidativo de *Acidithiobacillus ferrooxidans*, en un proceso de biodesulfurización de carbón. *rev.colomb.biote*, XVIII(Nro. 1), pp. 57- 64. Obtenido de <https://www.redalyc.org/comocitar.oa?id=77645907006>
- Pradhan, D., Patra, A. K., & Kim, D. J. (April de 2011). Review on bioleaching of uranium from low-grade ore. *Resource Recycling*, 20, pp. 30- 44. <https://doi.org/10.7844/kirr.2011.20.2.030>
- Pradhan, N., Nathsarma, K. C., Srinivasa Rao, K., Sukla, L. B., & Mishra, B. K. (2008). Heap bioleaching of chalcopyrite. *Minerals Engineering* 21, pp. 355-365. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.10.018>
- Ramírez Oscco, L. (2015). *Biolixiviación del cobre en minerales sulfurados refractarios como proceso preliminar para la lixiviación de oro por cianuración*. Lima: E.P. DE INGENIERÍA QUÍMICA, FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA, UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12672/5763>
- Rawling, D. E. (1998). Industrial practice and the biology of leaching of metals from ores: The 1997 Pan labs lecture. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 20: 268-274. <https://doi.org/10.1038/sj.jim.2900522>
- Rivera, R. E., Camejo, P. Y., Moya, F. J., López- Méndez, J. L., & Munguía- Bravo, M. (2011). *Estudio de Biolixiviación de un mineral de sulfuros de cobre de baja ley con bacterias Tio- Y Ferro-oxidantes en condiciones termófilas*. Distrito Federal, México: revista de la

- Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. Obtenido de <http://www.revistaingenieria.uda.cl/Publicaciones/260009.pdf>
- Rodríguez, Y., Blázquez, M. L., Ballester, A., González, F., & Muñoz, J. A. (2001). *La biolixiviación al comienzo del siglo XXI* (Vol. 37 Nro. 5). Madrid: Revista de metalurgia de Madrid. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.2001.v37.i5.528>
- Rohwerder, T., Gehrke, T., Kinzler, K., & Sand, W. (2003). Bioleaching review part A: Progress in bioleaching: fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation. *Applied Microbiological Biotechnology*, 63: 239-248. <https://doi.org/10.1007/s00253-003-1448-7>
- Rossi, G. (2001). The design of bioreactors. *Hidrometallurgy*, 59, pp. 217- 231. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00161-4](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00161-4)
- Sand, W., Gehrke, T., & Hallmann, R. (1995). Sulfur chemistry, biofilm, and the (in) direct attack mechanism a critical evaluation of bacterial leaching. *Appl. Microbiol. Biotechnol*, 43, pp. 961- 966. <https://doi.org/10.1007/BF00166909>
- Sand, W., Gehrke, T., Jozsa, P. G., & Schippers, A. (1999). Direct versus indirect bioleaching. (A. B. R. Amlis, Ed.) *Biohydrometallurgy and the Environment toward the Mining of the 21st Century*, Part A: 27-49. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00180-8](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00180-8)
- Shively, J. M., Van Keulen, G., & Meijer, W. G. (1998). Something from almost nothing: Carbon dioxide fixation in chemoautotrophs. *Annual Reviews of Microbiology*, 52, pp. 191- 230. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.52.1.191>

- Sugio, T., Domatsu, C., Munakata, O., Tano, T., & Imai, K. (1999). Role of ferric reducing system in sulfur oxidation of *Thiobacillus ferrooxidans*. *Applied and Environmental Microbiology*, 49, pp. 1401- 1406. <https://doi.org/10.1128/aem.49.6.1401-1406.1985>
- Tributsch, H. (2001). Direct versus indirect bioleaching. *Hidrometallurgy*, 59, pp. 177- 185. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00181-X](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00181-X)
- Tuovinen, O. H., Bhatti, T. M., Bigham, J. M., Hallberg, K. B., García, & Lindstrom, E. B. (1994). Oxidative dissolution of arsenopyrite by mesophilic and moderately thermophilic acidophiles. *Applied and Environmental Microbiology*, 60(9), pp. 3268- 3274. <https://doi.org/10.1128/aem.60.9.3268-3274.1994>
- Vallejo Gavira, J. (2015). *triplenlace.com*. Obtenido de <https://triplenlace.com/2015/05/03/bacterias-mineras-biolixiviacion-o-lixiviacion-bacteriana/>
- Van Breemen, N. (1973). Soil forming processes in acid sulphate soils. (P. I. (ed), Ed.) *Acid Sulphate Soils, Vol. I*, pp. 66- 130. Obtenido de <https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/5972/CA-11-10.pdf>
- Watling, H. R. (2006). *The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides, A- Hydrometallurgy* (Vols. 84 issues 1- 2). <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.05.001>
- Xia, L., Liu, J., Xiao, L., Zeng, J., Li, B., Geng, M., & Qiu, G. (2008). Single and cooperative bioleaching of sphalerite by two kinds of bacteria—*Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans*. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 12, pp. 190- 195. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60034-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60034-5)

Zepeda Álvarez, V. (2018). *Biolixiviación de minerales sulfurados de cobre de baja ley*. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Químicas, dpto. de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Obtenido de <https://eprints.ucm.es/id/eprint/49979/>

8. Anexos

8.1 Guía para hacer los Cálculos en la Reposición de Cianuro en las Pruebas de Lixiviación

La siguiente información fue obtenida del ing. Ángel Azañero Ortiz, 2013. En la cual se hace mención de la guía y el tema en la bibliografía.

8.1.1. Nitrato de Plata.

La solución de nitrato de plata para la titulación se prepara disolviendo 3.262 gramos de nitrato de plata cristalizada en agua destilada hasta hacer un litro y tomando 25 cm³ de la solución por analizar, 1 cm³ de la solución de nitrato de plata preparada como se ha indicado es equivalente a 0.01% de KCN.

Cuando en lugar de KCN se usa NaCN o los análisis se quiere tener en términos de cianuro de sodio, la solución de nitrato de plata se prepara disolviendo 4.333 gramos de nitrato de plata cristalizada en agua destilada hasta hacer un litro. Tomando 25 cm³ de la solución por analizar, 1 cm³ de solución de nitrato de plata es equivalente a 0.01% de cianuro de sodio. Las lecturas en las buretas deben tener un error +- 0.1 cm³.

Tabla 82

Concentración del nitrato de plata y el rango de detección respectivo de cianuro (Azañero Ortiz, 2013)

Concentración de AgNO ₃	Rango de detección(ppm)
2.1665 g/L	250 – 2,500
0.21665 g/L	25 – 250
0.021665 g/L	2.5 – 25

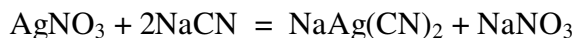
8.1.2. Determinación de la Pureza de Cianuro.

La pureza del cianuro de sodio o potasio se calcula pesando una cantidad fija del reactivo, por ejemplo unos 100 miligramos, la que se disuelve en un poco de agua, digamos 25 cm³. Se titula con solución de nitrato de plata preparada previamente disolviendo 3.262 o 4.333

gramos, como se ha indicado, así que 1 cm³ de solución satura 2.5 mg de KCN la primera y 2.5 mg de NaCN la segunda, de manera que si se trabaja con cianuros químicamente puros, se deberán tener consumos de 40 cm³ de solución de nitrato de plata, en ambos casos, si se obtiene menor lectura, el producto de ella por 2.5 dará el porcentaje de cianuro de potasio o cianuro de sodio en la sal.

8.1.3. Reacción Química en la Titulación.

El nitrato de plata reaccionará con el cianuro de sodio:



Significa que 169.9 gramos de nitrato de plata saturará 98 gramos de cianuro de sodio o 4.333 gramos de AgNO₃ saturarán 2.5 gramos de NaCN y cada cm³ de la solución de plata (0.00433 gramos de AgNO₃) satura 0.0025 gramos de NaCN.

Por lo tanto, si tomamos 25 cm³ de solución de cianuro para la titulación cada cm³ de nitrato de plata saturará 0.0025 gramos de NaCN o sea 0.01% de NaCN.

Por ejemplo, se titula 25 cm³ de solución de cianuro y se encuentra que se ha necesitado 4.8 cm³ de solución de plata; la fuerza de la solución de cianuro será por lo tanto 0.048% de cianuro de sodio.

Cuando se titula soluciones muy fuertes de cianuro es preferible proceder sobre menor volumen de muestra, digamos 10 cm³ y usándose la misma solución de plata, bastará multiplicar por 2.5 la lectura de la bureta para encontrar la fuerza de la solución.

Representa la titulación:

$$\text{Eq- g NaCN} = \text{Eq- g AgNO}_3$$

$$\frac{\text{Peso NaCN}}{P.E. NaCN} = \frac{\text{Peso AgNO}_3}{P.E. AgNO_3}$$

$$P.E. AgNO_3 \text{ (g/mol)} = 169.8740$$

$$P.E. NaCN \text{ (g/mol)} = 98.0160$$

$$\text{Peso AgNO}_3 \text{ (g)} = C AgNO_3 \text{ (g/L)} \times \text{Vol. AgNO}_3 \text{ (mL)}$$

$$\text{Peso NaCN (g)} = C NaCN \text{ (g/L)} \times \text{Vol. NaCN (mL)}$$

$$C AgNO_3 = 2.1665 \text{ g/L}$$

$$\text{Vol. NaCN} = 25 \text{ mL (Volumen utilizado para la titulación)}$$

$$\text{Vol. AgNO}_3 = \text{Volumen gastado en la titulación (mL)}$$

Luego:

$$\frac{C NaCN \text{ (g/L)} \times \text{Vol NaCN (mL)}}{P.E. NaCN} = \frac{C AgNO_3 \text{ (g/L)} \times \text{Vol AgNO}_3 \text{ (mL)}}{P.E. AgNO_3}$$

$$C NaCN \text{ (g/L)} = \frac{C AgNO_3 \text{ (g/L)} \times \text{Vol AgNO}_3 \text{ (mL)} \times P.E. NaCN}{P.E. AgNO_3 \times \text{Vol NaCN (mL)}}$$

En g/L:

$$C NaCN \text{ (g/L)} = 0.050 \times \text{Vol. AgNO}_3 \text{ (mL)}$$

En ppm:

$$C NaCN \text{ (ppm)} = 50 \times \text{Vol. AgNO}_3 \text{ (mL)}$$

En %:

$$C NaCN \text{ (%) } = 0.005 \times \text{Vol. AgNO}_3 \text{ (mL)}$$

Determinación de CN^- :

$$CN^- \text{ (%) } = NaCN \text{ (%) } \times \frac{26}{49}$$

$$CN^- \text{ (ppm)} = NaCN \text{ (ppm)} \times \frac{26}{49}$$

8.1.4. Cálculo del Consumo de Cianuro y Cal.

Supóngase que un frasco con 200 gramos de mineral fino se preparó para trabajar con dilución de 3 a 1 (600 cm^3) y concentración de 0.30% NaCN (1.800 gramos o 18 cm^3 de solución al 10% NaCN) por lo que la primera adición de cianuro fue de 1.800 gramos.

A las 24 horas se tomaron 25 cm^3 de solución que analizaron 0.20% NaCN o sea que se retiraron del frasco de $25 \times 0.0020 = 0.050$ gramos. NaCN. En el mismo frasco quedaron 575 cm^3 de solución que contiene $575 \times 0.0020 = 1.150$ gramos NaCN.

Al regresar el frasco a la agitación debe contener 600 cm^3 de solución al 0.30% NaCN, por lo fue necesario adicionar 25 cm^3 de agua y $1.800 - 1.150 = 0.650$ gramos NaCN (6.5 cm^3 de solución al 10%).

A las 48 horas se tomaron 25 cm^3 de solución que analizaron 0.26% NaCN y se retiraron consecuentemente $25 \times 0.0026 = 0.065$ gramos NaCN. En el frasco quedaron 575 cm^3 de solución que contienen $575 \times 0.0026 = 1.495$ gramos NaCN.

Al regresar el frasco a la agitación, nuevamente debe contener 600 cm^3 de solución y 1.800 gramos NaCN, por lo que hubo que adicionar 25 cm^3 de agua y $1.800 - 1.495 = 0.305$ gramos NaCN (3.5 cm^3 de solución al 10%).

A las 72 horas se tomaron 25 cm^3 de solución que analizaron 0.29 % NaCN, demostrando que prácticamente ya no hubo consumo de cianuro, por lo tanto el frasco debe salir ya que el tratamiento ha terminado. Los 600 cm^3 de solución del frasco con 0.29% NaCN contenían $600 \times 0.0029 = 1.740$ gramos NaCN.

Sumando las adiciones y extracciones de NaCN, se obtiene por diferencia el consumo, como se ve en el cuadro que sigue:

Tabla 83

Resumen del cianuro de sodio repuesto por cada periodo hasta el término de la lixiviación (Azañero Ortiz, 2013)

NaCN ADICIONADO		NaCN EXTRAÍDO	
Inicial	1.800 gramos		
24 horas		25 cm ³ al 0.20%	0.050 gramos
24 horas	0.650 gramos		
48 horas		25 cm ³ al 0.26%	0.065 gramos
48 horas	0.305 gramos		
72 horas		600 cm ³ al 0.29%	1.740 gramos
TOTAL	2.755 gramos		1.855 gramos

Consumo $2.755 - 1.855 = 0.900$ gramos NaCN por 200 gramos de mineral.

Consumo NaCN por tonelada = $\frac{1000 \times 0.900}{200} = 4,500$ g de NaCN por tonelada de mineral.

Observaciones:

Determinar la pureza del cianuro para posteriormente calcular el peso exacto de cianuro comercial que se debe agregar.

Para determinar el consumo de cal se procede de manera idéntica a lo realizado para el cálculo de cianuro de sodio.

8.1.5. Determinación de la Alcalinidad de la Solución Cianurada.

Se emplea el ácido oxálico o un ácido mineral, con el oxálico la reacción es:



De las fórmulas se deduce que:

126 gramos de ácido oxálico saturan 56 gramos de cal o 5.62 gramos de ácido oxálico saturan 2.5 gramos de cal, lo que se obtiene por simples proporciones.

Entonces si hacemos una solución que contenga 5.62 gramos de ácido oxálico por litro cada cm^3 de esta solución (que contiene 0.00562 gramos de ácido oxálico) saturará 0.025 gramos de cal y si se toma 25 cm^3 de solución cianurada para titular por cal, cada cm^3 de ácido oxálico saturará 0.025 gramos de cal o sea 0.01% de la solución.

Ejemplo:

Si se ha necesitado 3.6 cm^3 de ácido oxálico para neutralizar 25 cm^3 de solución muestra, la alcalinidad del líquido habrá sido equivalente a 0.036 % de CaO, como indicador se usa fenolftaleína (1 gramo de fenolftaleína en 50 cm^3 de alcohol diluido en 100 cm^3 de agua) que da la coloración al terminarse la reacción.

La titulación se puede hacer sobre la misma solución usada para determinar el cianuro, colocando previamente una a dos gotas del indicador. Si la solución es alcalina el líquido tomará una coloración rosada, se agrega el ácido gota a gota hasta que desaparezca este color y se lee la bureta.

Generalmente, un CaO o álcali protector de 0.05% da la cantidad de cal conveniente para minerales de oro y 0.10% para minerales auroargentíferos o argentíferos solamente.

8.2 Determinación experimental del tiempo de duración y etapas del pretratamiento

Para determinar el tiempo (en días) y el número de etapas del pretratamiento, se sometió al contacto dinámico entre la pulpa y la solución bacteriana enfocándonos en que tiempo las curvas del Potencial de Óxido Reducción y la población bacteriana coincidían (en un tiempo “ $t = t_0$ ”) en pendientes muy próximas a cero (paralelas al eje “X”).

8.2.1. Curvas de Potencial Óxido Reducción en Función al Tiempo.

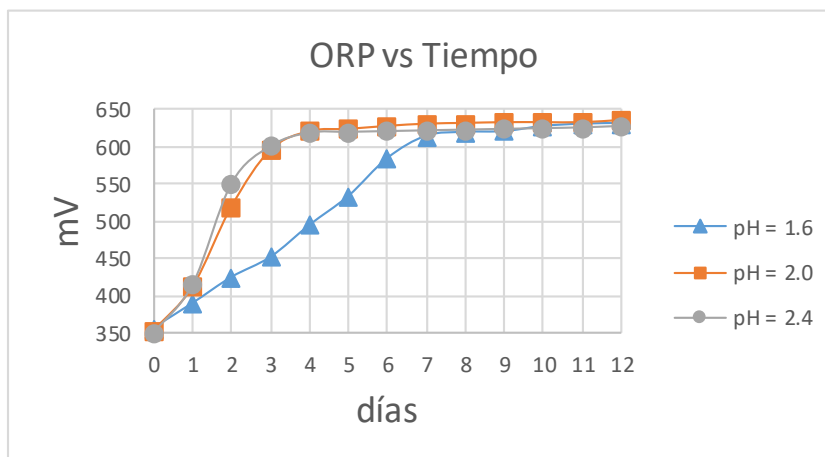


Figura N° 89. Curvas del ORP en función al tiempo de interacción entre pulpa y solución bacteriana en muestras al 5% en porcentaje de sólidos a distintos pH constantes.
Fuente: Elaborado usando Excel 2013

8.2.2. Curvas de la Población Bacteriana en Función al Tiempo.

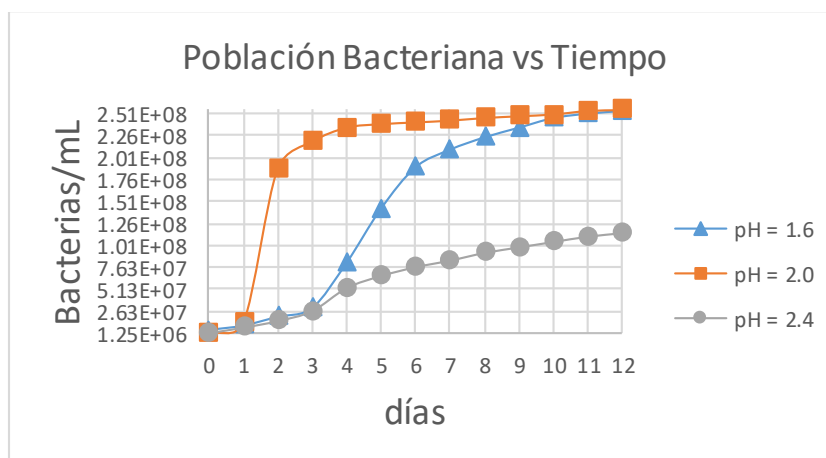


Figura N° 90. Curvas de la población bacteriana en función al tiempo de interacción entre pulpa y solución bacteriana en muestras al 5% en porcentaje de sólidos a distintos pH constantes.

8.2.3. Curvas del Porcentaje de Recuperación del Ion Fierro en Función al Tiempo.

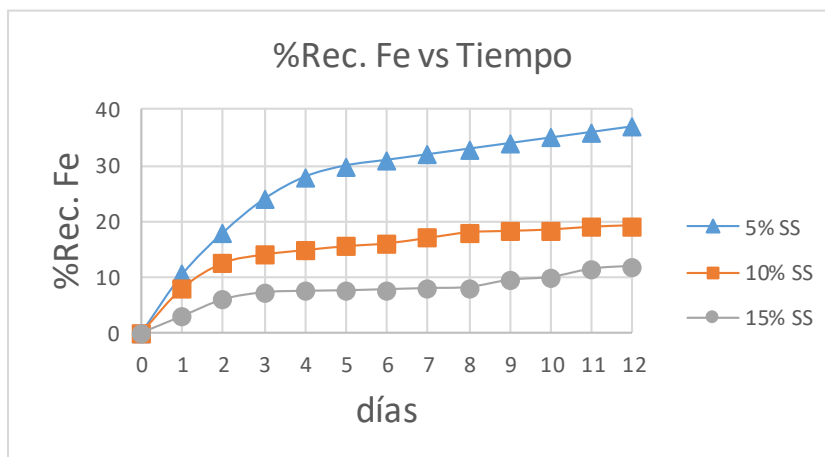


Figura N° 91. Curvas del porcentaje de recuperación del ion hierro en función al tiempo de interacción entre pulpa y solución bacteriana en muestras a distintos porcentajes de sólido a un pH igual a 2.

Fuente: Elaborado usando Excel 2013

Por lo tanto, comparando los gráficos anteriores en esta sección, se concluye que la curva es más pronunciada hasta el día 4, es decir, el incremento de la pendiente es mucho mayor del día 0 al día 4 comparando del 4 al 12, por consiguiente se distribuyó en 3 etapas conteniendo 4 días por etapa durante 12 días. Se estableció un tiempo del pretratamiento de 12 días ya que hasta ese punto no hay un cambio significativo relacionado al %Rec. Fe, ORP y Población Bacteriana reflejado en su pendiente en las curvas.

8.3 Conteo Celular

Cualquier experimento o estudio en el que se trabaje con células requiere que estas células estén en cantidades conocidas y adecuadas. Para cuantificar las células de una suspensión celular existen distintos métodos. A pesar de los grandes avances en la ciencia, aún hoy en día uno de los métodos más utilizados por su sencillez y bajo coste, es la observación microscópica directa y el recuento de células en cámaras de recuento celular o hemocitómetros. (insilico.ehu, s.f.)

Los cuatro cuadros de 1 mm^2 localizados en cada esquina poseen a su vez 16 cuadros de 0.0625 mm^2 . El cuadro central (también de 1 mm^2) se encuentra compuesto por 25 cuadros de 0.04 mm^2 (en verde). Estos cuadros a su vez se encuentran compuestos por cuadros menores de tan solo 0.0025 mm^2 (en negro). Dada la profundidad de la cámara de tan solo 0.1 mm , cada una de estas unidades corresponde a volúmenes fijos conocidos, según se ilustra en la [Fig. 92](#).

Cuadrícula	Color	Área	Volumen
3x3	Blue	1 mm^2	100 nl
4x4	Red	0.0625 mm^2	6.25 nl
4x4	Green	0.04 mm^2	4 nl
1x1	Black	0.0025 mm^2	0.25 nl

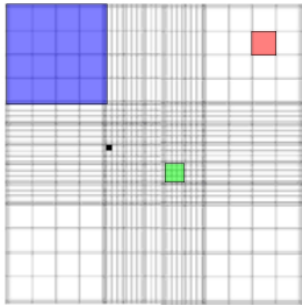


Figura N° 92. Secciones a considerar en el conteo celular en la cámara de recuento bacteriano.
Fuente: (Laboratorio de Genómica Viral y Humana, Facultad de Medicina UASLP, 2008)

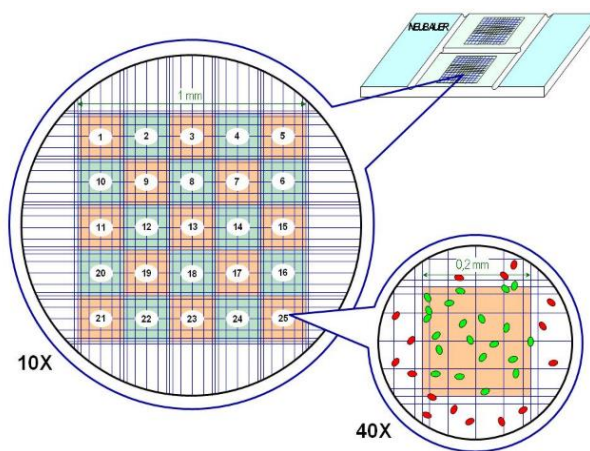


Figura N° 93. Manejo de la cámara de recuento celular Neubauer improved.
Fuente: (insilico.ehu, s.f.)

Según lo citado en la fuente (insilico.ehu, s.f.):

La cuadrícula de recuento está formada por 9 cuadrados grandes, cada uno de ellos con una superficie de 1 mm². Los cuatro cuadrados grandes de las esquinas ([Fig. 92](#)), están formados por 16 cuadrados medianos. El cuadrado grande central (que se puede ver en su totalidad con el objetivo 10X, [Fig. 93](#)) está dividido en 25 cuadrados medianos (con el objetivo 40X se pueden ver los cuadrados medianos completamente, [Fig. 93](#)) cada uno de ellos con 16 cuadrados pequeños en su interior.

El recuento se puede realizar tanto en el cuadrado grande central como en los de las esquinas, dependiendo del tamaño de las células en estudio. En este ejemplo realizaremos el recuento en el cuadrado central.

Cuando colocamos la muestra bajo el cubreobjetos, la suspensión celular alcanza una altura de 0,1 mm. Teniendo estos datos en cuenta, y si consideramos uno de los cuadrados grandes, el volumen contenido en éste será de:

$$1 \times 1 \times 0,1 = 0,1 \text{ mm}^3 = 10^{-4} \text{ ml}$$

Con el objetivo 10X del microscopio hay que localizar la zona de recuento (uno de los cuadrados grandes). Para contar las células se cambia al objetivo 40X. Se cuentan las células contenidas en todos los cuadrados medianos (25 si hemos elegido como zona de recuento el cuadrado grande central o 16 si hemos elegido una de las esquinas) de acuerdo con el siguiente criterio:

Hay que contar todas las células que están dentro de cada cuadrado mediano y aquellas que están tocando los lados superior y derecho de dicho cuadrado (aunque estén parcialmente fuera). Siguiendo este criterio, en la figura se contarían las células en color verde, y no se contarían las células en color rojo.

Si hemos contabilizado N células en uno de los cuadrados grandes (o sea, en 25 cuadrados medianos), la concentración de nuestra muestra será:

$$N \times 10^4 \text{ cel/ml}$$

Si para hacer el recuento hemos tenido que concentrar o diluir la muestra inicial, hemos de tener en cuenta este factor de concentración- dilución (f):

$$N \times 10^4 \times f \text{ cel/ml}$$

Suspensión celular inicial = suspensión celular diluida $\times$ factor de concentración-dilución.

8.4 Medio de Cultivo Bacteriano

La preparación de un cultivo o conjunto de bacterias requiere de un medio, que es una solución nutriente sobre la que se cultivan las bacterias en laboratorio de Biometalurgia. El medio utilizado en nuestro caso es el 9K líquido.

Las bacterias utilizadas en este trabajo provienen de aguas ácidas de un yacimiento minero, pero previamente fueron aisladas y adaptadas por unos meses al mineral del presente estudio.

Para reactivar la cepa adaptada (ya que se tenía en un ambiente refrigerado), se hizo lo siguiente:

1. Se sacó la cepa del ambiente refrigerado y se dejó al medio para tener la misma temperatura del ambiente del laboratorio.
2. En un matraz Erlenmeyer de 500 mL se agregó 180 mL de solución 9K y se le añadió 20 mL de la cepa para reactivar. Se colocó sobre un agitador de muestras (shaker) a una velocidad media de 150 rpm y se llevó el pH de esta mezcla a aproximadamente 2.0- 1.9 llevándose a cabo a temperatura ambiente.

3. Luego de 3 días se iba apreciando el cambio de coloración del medio líquido (de incoloro a amarillo y posteriormente a rojo), esto nos indicaba cualitativamente la oxidación del hierro (II) a hierro (III) fundamentalmente por la presencia de las bacterias *At. ferroxidans* en el 9K.
4. Se extrajo 20 mL de la cepa reactivada y se preparó nuevamente 180 mL de 9K (esta vez sin sulfato ferroso heptahidratado, para que las bacterias solo aprovechen el fierro (II) de los sulfuros presentes en el mineral, principalmente de la pirita), y se añadió 15 g de mineral, llevándolo a las mismas condiciones del paso nro. 2.

El objetivo es que las bacterias estén en contacto nuevamente con el mineral y aprovechen el fierro (II) de la matriz de pirita presente en la muestra e inocular posteriormente para las futuras pruebas. Con esto se habrá logrado que la bacteria se vea en la necesidad de aprovechar los medios nutricionales presentes en el sólido (mineral sulfurado), principalmente del fierro (II) presente en la pirita (matriz refractaria de interés), para lograr su disolución parcial y poder optimizar la recuperación de oro posteriormente en la cianuración (posbiolixiviación).

Tabla 84
Composición del 9K líquido

Compuesto	g en 200mL	g/L
(NH ₄) ₂ SO ₄	0.30	1.50
MgSO ₄ .7H ₂ O	0.10	0.50
K ₂ HPO ₄	0.10	0.50
KCl	0.02	0.10
Ca(NO ₃) ₂	0.01	0.05
FeSO ₄	6.00	30.00

Nota: No se añadió el FeSO₄ a las pruebas.

8.4.1. Tipos de Medio de Cultivo.

Según lo citado por (Barreto Cuevas, 2016), existen tres tipos de medios de cultivo según la proporción de agar.

1. Los líquidos (caldos) que no contiene ningún agente gelificante, por lo que los microorganismos crecen por todo el medio. El crecimiento en este tipo de medios es más rápido puesto que la movilidad permite acceder de una forma más fácil a los nutrientes.
2. Los sólidos que tienen una proporción de agar de, aproximadamente, el 1,5%. El crecimiento se desarrolla en la superficie del medio. Estos medios pueden depositarse en placas de Petri o en tubos de ensayo.
3. Los semisólidos. Son aquellos que contienen una proporción de agar inferior al 0,5%. Se utilizan para pruebas bioquímicas y de movilidad.

Así mismo (Barreto Cuevas, 2016) afirma que en microbiología diagnóstica existen cuatro tipos, según su utilidad:

1. Los nutritivos que permiten el crecimiento de la mayoría de los microorganismos, por ser muy generales. Como ejemplo de este tipo de medios están el agua de peptona y el caldo de tripticasa- soja.
2. De enriquecimiento, que contienen componentes adicionales (además de los básicos) para permitir el desarrollo de microorganismos exigentes, que no crecerían en un medio general.
3. Los Selectivos presentan algún componente que impide el desarrollo de microorganismos no deseados. Esto hace que el microorganismo que se desea cultivar lo haga con mayor facilidad. Por ejemplo, el agar Mac Conkey contiene cristal violeta, que inhibe el crecimiento de bacterias Gram positivas y hongos, facilitando el desarrollo de bacterias Gram negativas.

4. Los Diferenciales que contienen sustancias que ponen de manifiesto alguna característica de la especie o grupo de microorganismos. Por ejemplo, el agar Mac Conkey contiene lactosa y rojo neutro (como indicador); las bacterias fermentadoras de lactosa (lactosapositivas) aparecen de color rosa intenso, mientras que las no fermentadoras de lactosa son incoloras.

8.4.1.1. ¿Por qué existen diferentes formatos de medios de cultivo?

En los medios de cultivo sólidos, los microorganismos crecen sobre la superficie; esto permite la formación de colonias aisladas, un paso fundamental para la identificación microbiana. Al mismo tiempo, este tipo de medios permite un fácil acceso al microorganismo para una posterior manipulación. Si el objetivo del cultivo es simplemente la multiplicación del microorganismo, se suelen utilizar cultivos líquidos. (Barreto Cuevas, 2016)

A continuación se citan algunos ejemplos sobre lo que afirma autor en mención en el párrafo anterior sobre qué formato es el más adecuado en cada caso:

- ✓ Para aislar colonias: medio sólido en placa.
- ✓ Para conservar un cultivo durante un periodo de tiempo largo: agar inclinado (sólido en tubo). En este formato los microorganismos tienen mayor disponibilidad de nutrientes.
- ✓ Para detección del crecimiento microbiano: medios líquidos.



Figura N° 94. Cepas bacterianas de *Acidithiobacillus ferrooxidans* reactivadas para ser usadas en el pretratamiento. Se observa como las bacterias oxidan principalmente el ion ferroso del 9K líquido de izquierda a derecha, siendo el color más intenso (rojo) indicador de la presencia del ion férrico.

Fuente: Fotografía tomada de las cepas bacterianas en el Laboratorio de Biometalurgia