



UNIVERSIDAD
PRIVADA
DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERIA

CARRERA DE INGENIERIA DE MINAS

“INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE PULPA Y PH
SOBRE LA HIDROFOBOCIDAD DE COBRE EN
MINERAL TIPO SULFURO, CALQUIS, CAJAMARCA,
2017”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autores:

Bach. Alithu Isabel Ramirez Delgado
Bach. Katherine Gabriela Torres Núñez

Asesor:

Ing. Rolando Iván Ramos Morantes

Cajamarca – Perú
2017

APROBACIÓN DE LA TESIS

El asesor y los miembros del jurado evaluador asignados, **APRUEBAN** la tesis desarrollada por los Bachilleres Alithu Isabel Ramirez Delgado & Katherine Gabriela Torres Núñez, denominada:

**“INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE PULPA Y PH SOBRE LA
HIDROFOBICIDAD DE COBRE EN MINERAL TIPO SULFURO, CALQUIS,
CAJAMARCA, 2017.”**

Ing. Rolando Iván Ramos Morantes
ASESOR

Ing. Vladimir Hector, Yataco Dueñas
**JURADO
PRESIDENTE**

Ing. Augusto Marino, López Vega
JURADO

Mg. Ing. Danyer Stewart Girón Palomino.
JURADO

DEDICATORIA

Agradecer a Dios, por acompañarnos y ayudarnos durante toda nuestra carrera y permitirnos concluir nuestros estudios y a todas esas personas que de una u otra forma nos orientaron y apoyaron a lo largo del camino.

A nuestras familias por estar allí compartiendo nuestro entusiasmo en los momentos de felicidad y brindarnos su soporte y colaboración en los momentos difíciles. Nuestros padres son nuestra mayor inspiración y nuestros pilares incondicionales. Los adoramos.

A nuestros queridos hermanos, que han estado en los momentos más difíciles y me han servido de apoyo incondicional, brindándonos todo su aprecio y consideración. Los queremos.

Alithu Ramirez Delgado

Katherine Torres Núñez

AGRADECIMIENTO

Nuestro más sincero agradecimiento al Ing. Rolando Iván Ramos Morante, por su asesoramiento en la ejecución del proyecto de investigación.

A la plana docente de la Universidad Privada del Norte que gracias a sus enseñanzas hicieron posible mi formación profesional.

Alithu Ramirez Delgado

Katherine Torres Núñez

ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DE LA TESIS	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE FOTOS.....	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. Realidad problemática.....	13
1.2. Formulación del problema	14
1.3. Justificación	14
1.4. Limitaciones	14
1.5. Objetivos.....	15
1.5.1. Objetivo General	15
1.5.2. Objetivos Específicos.....	15
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	16
2.1. Antecedentes.....	16
2.2. Bases Teóricas.....	20
2.2.1. Generalidades.....	20
2.2.2. Producción minero metalúrgica de cobre	20
2.2.3. Cobre	23
2.2.4. Especies minerales comerciales de cobre	25
2.2.5. Metalurgia del cobre	26
2.2.6. Usos del cobre	27
2.2.7. Purificación y concentración de la solución lixiviada	28
2.2.8. Hidrofobicidad.....	29
2.2.9. Flotación	30
2.2.10. Naturaleza física de superficies	34
2.2.11. Adsorción	35

2.2.12.	Termodinámica de la flotación	36
2.2.13.	Cinética de la flotación.....	37
2.2.14.	Variables de la flotación.....	39
2.2.15.	Reactivos de flotación.....	42
2.3.	Definición de términos básicos	43
2.4.	Hipótesis	45
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....		46
3.1.	Operacionalización de variables	46
3.2.	Diseño de investigación	47
3.2.1.	Según el propósito: Aplicada	47
3.2.2.	Según el diseño de investigación: Experimental	47
3.2.3.	Según el tipo de investigación experimental: Experimental pura	47
3.3.	Unidad de estudio	48
3.4.	Población	48
3.5.	Muestra.....	48
3.6.	Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos	49
3.6.1.	Técnicas de recolección de datos	49
3.6.2.	Instrumentos y materiales.....	49
3.6.3.	Procedimiento de recolección de datos.....	52
3.7.	Métodos, instrumentos y procedimientos de análisis de datos	54
CAPÍTULO 4. DESARROLLO.....		54
4.1.	Protocolo de flotación	54
CAPÍTULO 5. RESULTADOS		57
CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN.....		58
CONCLUSIONES		60
RECOMENDACIONES		61
REFERENCIAS.....		62
LINKOGRAFÍA		64

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
TABLA N° 01. Producción de los principales metales en el Perú 2005 - 2014	23
TABLA N° 02. Propiedades químicas del cobre.....	26
TABLA N° 03. Especies minerales comerciales del cobre	26
TABLA N° 04. Definición operacional de las variables.....	47
TABLA N° 05. Esquema del proceso experimental - puro.....	49
TABLA N° 06. Ley de cobre del mineral de estudio	49
TABLA N° 07. Ley de cobre en el relave después de realizar los ensayos (Ley _i = 7.9 % Cu).....	58
TABLA N° 08. Porcentaje de recuperación de cobre después de realizar los ensayos (Ley _i = 7.9%Cu).....	58
TABLA I. Resultados de la ley de relave de cobre después de realizar los ensayos (Ley _i = 7.90%).....	66
TABLA II. Tabla resumen del Porcentaje (%) de recuperación de cobre por la influencia de la densidad de pulpa y pH	67
TABLA III. Balance metalúrgico por hidrofobicidad a pH 9.0 y densidades de pulpa al 25 % de sólidos.....	68
TABLA IV. Balance metalúrgico por hidrofobicidad a pH 9.0 y densidades de pulpa al 30 % de sólidos.....	69
TABLA V Balance metalúrgico por hidrofobicidad a pH 9.0 y densidades de pulpa al 35 % de sólidos.....	70
TABLA VI. Balance metalúrgico por hidrofobicidad a pH 10.5 y densidades de pulpa al 25 % de sólidos.....	71

TABLA VII. Balance metalúrgico por hidrofobocidad a pH 10.5 y densidades de pulpa al 30 % de sólidos.....	72
TABLA VIII. Balance metalúrgico por hidrofobocidad a pH 10.5 y densidades de pulpa al 35 % de sólidos.....	73
TABLA IX. Balance metalúrgico por hidrofobocidad a pH 12.0 y densidades de pulpa al 25 % de sólidos.....	74
TABLA X. Balance metalúrgico por hidrofobocidad a pH 12.0 y densidades de pulpa al 30 % de sólidos.....	75
TABLA XI. Balance metalúrgico por hidrofobocidad a pH 12.0 y densidades de pulpa al 35 % de sólidos.....	76
TABLA XII. Hidrofobocidad de cobre en función de la recuperación a diferentes densidades de pulpa y pH.....	79
TABLA XIII. Cuadro resumen del análisis de varianza para la hidrofobocidad de cobre en función de su recuperación.....	84

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA N° 01. Producción Metálica en el 2010 por participación por empresas mineras	23
FIGURA N° 02. Gráfica Ranking Mundial del Cobre 2010	24
FIGURA N°03: Precio Internacional del Cobre, desde junio 2012 hasta marzo 2017.....	24
FIGURA N° 04: Esquema general del tratamiento hidrometalúrgico de un mineral.....	30
FIGURA N° 05: Adsorción de un colector en la superficie de un espumante	33
FIGURA N° 06: Acción de un espumante	34
FIGURA N° 07. Mecanismo de flotación por espuma	34
FIGURA N° 08. Angulo de contacto en un sólido.....	38
FIGURA N° 09. Curva: % de Recuperación vs. Tiempo de flotación	39
FIGURA N° 10. Procedimiento experimental de flotación de mineral.....	54
FIGURA N° 11. Resultados de la Ley de cobre del relave después de realizar los ensayos (Leyi = 7.9 % Cu) con la influencia del pH y la densidad de pulpa.58	
FIGURA N° 12. Resultados del porcentaje de recuperación de cobre después de realizar los ensayos (Leyi = 7.9 % Cu) con la influencia del pH y la densidad de pulpa	60

ÍNDICE DE FOTOS

	Pág.
FOTO N°01. Ubicación del distrito de Calquis, Provincia de San Miguel, Cajamarca	86
FOTO N°02. Mineral polimetálico del sur de Cajamarca en el distrito de Calquis, provincia de San Miguel	87
FOTO N° 03. Cabando para la toma de muestra	88
FOTO N°04. El mineral.....	89
FOTO N°05: Molienda del mineral.....	89
FOTO N°06. Secado del mineral	90
FOTO N°07: Extracción del concentrado de cobre	90
FOTO N°08. Extracción del concentrado de cobre	91
FOTO N°09: Ensayo de espectrofotometría	91

RESUMEN

Se estudió la influencia de la densidad de pulpa y pH sobre la hidrofobicidad de cobre en mineral tipo sulfuro proveniente de Calqui, Cajamarca.

El estudio experimental se realizó en una celda de flotación de laboratorio, modelo Denver D-12, utilizando mineral con diferentes densidades de pulpa en función de porcentajes de sólidos a 25% sol, 30%sol y 35%sol, con una ley de 7.9 % de cobre.

El resultado del estudio de la hidrofobicidad concluyó que la recuperación de cobre a pH de 9.0 y 25 % de sólido fue de 68.33 % y a medida que ambas variables aumentaban, la recuperación también aumentaban, es así que se llegó obtener una recuperación de 86.80 % a pH 10.5 y 30 % de sólido.

Los resultados son confirmados mediante análisis de varianza para un nivel de confianza de 95%. De esto se concluye que la hidrofobicidad de cobre en función de su recuperación por la influencia del pH es de $F_0 = 177.8079$ es mayor al $F_{0.05;2;18} = 3.55$, y la influencia de la densidad de pulpa es de $F_0 = 376.9927$ es mayor al $F_{0.05;2;18} = 3.55$ y con la influencia del pH y la densidad de pulpa es de $F_0 = 15.9613$ es mayor al $F_{0.05;4;18} = 2.93$, obtenido de manera tabular. Esto confirma la aceptación de la hipótesis alterna, por lo tanto, la influencia de pH y densidad de pulpa de manera individual como en conjunto si afectan significativamente en la hidrofobicidad del cobre en función de su recuperación.

ABSTRACT

The influence of pulp density and pH on the hydrophobicity of copper in sulfide - type mineral from Calqui, Cajamarca was studied.

The experimental study was performed in a laboratory flotation cell, Denver D-12 model, using mineral with different pulp densities as a percentage of solids at 25% sol, 30% sol and 35% sol, with a law of 7.9 % coppermade.

The result of the hydrophobicity study concluded that copper recovery at pH 9.0 and 25% of solid was 68.33% and as both variables increased, recovery also increased, so a recovery of 86.80% was achieved pH 10.5 and 30% solid.

The results are confirmed by analysis of variance for a confidence level of 95%. From this it is concluded that the copper hydrophobicity as a function of its recovery by the influence of the pH is $F_0 = 177.8079$ is greater than $F_{0.05; 2; 18} = 3.55$, and the influence of the pulp density is $F_0 = 376.9927$ is greater than $F_{0.05; 2; 18} = 3.55$ and with the influence of pH and pulp density is $F_0 = 15.9613$ is greater than $F_{0.05; 4; 18} = 2.93$, obtained in a tabular manner. This confirms the acceptance of the alternative hypothesis, therefore, the influence of pH and pulp density individually as a whole if they affect significantly the copper hydrophobicity as a function of its recovery.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

El proceso de hidrofobicidad de minerales constituye el principal método de concentración de minerales de cobre actualmente en uso. En Perú se utiliza principalmente para el tratamiento de minerales sulfurados de cobre, de los cuales es posible obtener otros subproductos del proceso de flotación (Astucuri, 2014).

Dado que de las especies de cobre, las de mayor abundancia son los sulfuros, los procesos asociados a su concentración son de una importancia crucial y cualquier mejora que se pueda incorporar redundaría en un significativo aumento de las utilidades en la minería (Bravo, 2012)

La concentración por flotación es el resultado de la interacción de muchas variables, que involucran factores fisicoquímicos, operacionales y mecánicos. La velocidad de agitación, el flujo de aire y el diseño de la celda crean las condiciones hidrodinámicas, régimen de flujos, mezclamiento, granulometría, dispersión de gas, interacción burbuja-partícula, pH son parámetros que gobiernan el rendimiento del proceso de flotación (Astucuri, 2014).

Es vital mencionar que el estudio de la densidad de pulpa de un mineral es muy importante. Esta densidad de pulpa adecuada permitirá evaluar el costo beneficio determinado por % de sólidos vs. liberación del material valioso & porcentaje de recuperación óptima (Porras, 2012).

Así mismo, el pH es la variable de control más utilizada en la flotación, ya que resulta fundamental en la recuperación y selectividad, así como, en la depresión de minerales. En la flotación es sumamente sensible al pH, especialmente cuando se trata de flotación selectiva. Los reactivos de flotación, principalmente los colectores, operan mejor en ciertos rangos de pH. La regulación del pH en la flotación de cobre se realiza con cal. Este reactivo es importante, ya que, además de actuar como modificador de pH, es un depresor de pirita en la flotación selectiva de minerales de cobre en la etapa de limpieza.

Ante las situaciones planteadas, se pretende estudiar mediante el presente trabajo experimental de laboratorio y análisis teórico de los fundamentos del fenómeno, la influencia de la densidad de pulpa y el pH sobre la hidrofobicidad de cobre en mineral tipo sulfuro, proveniente del Calquis - Cajamarca, buscando de esta manera generar un mayor conocimiento con miras al análisis y optimización del proceso.

12. Formulación del problema

¿En qué medida influye la densidad de pulpa y el pH sobre la hidrofobicidad de cobre en mineral tipo sulfuro de Calquis – Cajamarca?

13. Justificación

La necesidad de contar con herramientas y metodologías basadas en el conocimiento de parámetros de optimización del proceso de flotación de minerales tipo sulfuro y su relación con la hidrofobicidad de metales valiosos como el cobre permitirá conocer termodinámicamente los mecanismos del proceso, y así realizar una evaluación pertinente y adecuada del empleo apropiado del pH y la densidad de pulpa del mineral a tratar.

El presente trabajo de investigación permitirá a las empresas e interesados en contar con una herramienta básica para la comprensión de la relación entre la densidad de pulpa del mineral tipo sulfuro y el pH de trabajo; que ayudara a proponer una metodología de trabajo pertinente en la hidrofobicidad del cobre.

14. Limitaciones

El presente trabajo involucra una serie de etapas, desde un trabajo de gabinete y laboratorio a un trabajo de campo. En el trabajo de campo se deberá solicitar la debida autorización de los comuneros de la zona para la obtención del mineral sulfurado; así mismo, no existen carreteras asfaltadas para llegar a la zona, solo existen trochas en mal estado, los cuales se deberá tomar las medidas pertinentes en temas climatológicas que puedan limitar la extracción de la muestra como lluvias excesivas ya que estos eventos inesperados podrían interrumpir las actividades de muestreo y así aplazar el cronograma de trabajo ya establecido.

15. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Determinar cómo influye la densidad de pulpa y el pH sobre la hidrofobicidad de cobre en mineral tipo sulfuro de Calquis, Cajamarca.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Determinar la densidad de pulpa óptima en la flotación de un mineral tipo sulfuro, de Calquis, Cajamarca, para obtener una adecuada hidrofobicidad del cobre.
- Evaluar la influencia del pH en la flotación de un mineral tipo sulfuro de Calquis, Cajamarca, para obtener una adecuada hidrofobicidad del cobre.
- Determinar la interacción de la densidad de pulpa y el pH en la flotación de un mineral tipo sulfuro de Calquis, Cajamarca.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

En los últimos años, se han realizado varios estudios orientados a resolver limitaciones en los parámetros de trabajo en flotación por efecto de la hidrofobicidad de cobre. De la misma manera se ha intentado mejorar los procesos por medio de predicciones a través de modelos matemáticos (Domic, 2012).

Según Barona (2016), en su tesis denominada “Influencia de la distribución de tamaño de burbujas en la recuperación de la flotación para minerales de cobre”, determina que al variar el P_{80} , la recuperación global y del tamaño medio presenta una parábola invertida, en donde al engrosar o afinar la granulometría del mineral, baja la recuperación. Por otro lado para los tamaños extremos de mineral al aumentar el P_{80} aumenta la recuperación. Este último efecto hay que entenderlo dentro del marco de condiciones en que se dieron las pruebas, ya que en aquellas con mineral fino, P_{80} bajo, la flotación se desarrolló en condiciones adversas para la flotación de mineral fino y grueso, mientras que las flotaciones de mineral grueso, fueron desarrolladas en condiciones muy favorables para la recuperación de mineral fino y grueso. En función de lo anterior, al aumentar el p_{80} aumenta la recuperación por tamaños, sobre todo para minerales finos y gruesos, producto que el aumento de granulometría, a iguales condiciones de flujo de aire y agitación, impacta en la distribución de tamaño de burbujas, mejorando el marco para la recuperación de mineral de los tamaños descritos. Al aumentar la agitación en la celda, aumenta la recuperación, ya sea global como por tamaños. Se aprecia que el efecto es mayor a medida que aumenta el tamaño de partículas, esto podría deberse a que a medida que aumenta la agitación, los agregados de burbuja-partícula más finos se vuelven más inestables. El aumento de superficie total disponible para la flotación, impacta positivamente en la recuperación de minerales de todos los tamaños, T1 (gruesos), T2 (medios) y T3 (finos), en donde se generan condiciones más favorables para que estas partículas puedan ser recuperadas. Esto es absolutamente lógico, desde el punto de vista que en flotación uno de los puntos importantes es la superficie disponible para la

adherencia de la partícula, ya que la burbuja funciona como vehículo transportador de la partícula. Si se separa el mineral en gruesos y finos, tal vez con un ciclón previo a la flotación, y se modifican las condiciones de flotación, agitación y caudal de gas, es posible aumentar la flotabilidad de las partículas extremas, la fracción más gruesa de bajo tamaño del ciclón, y la fracción más fina del sobre tamaño del ciclón, sin perjudicar la flotabilidad del rango medio de partículas (la fracción fina del bajo tamaño y la fracción gruesa del sobre tamaño), aumentando la recuperación global.

Según Tobón (2013), en su tesis denominada “Estudio de la hidrofobicidad de oro nativo y su efecto en la flotación espumante directa”, menciona que Mediante la flotación espumante como proceso de separación del oro presente en los depósitos aluviales, se presenta la alternativa de eliminar el uso de mercurio en las plantas metalúrgicas. La flotación espumante es más selectiva que los procesos gravitacionales utilizados en la actualidad para la recuperación de oro nativo. Además, Mejora la eficiencia de recuperación en rangos de tamaño más grandes que los actuales, y es posible recuperar oro de tamaño fino. Gracias a la variedad de tecnologías disponibles para el proceso de flotación espumante y a las variables de operación de estas tecnologías, se puede conseguir altos porcentajes de recuperación, inclusive procesando minerales con rangos de tamaño diferentes. En esta investigación se obtuvo 97.5% de recuperación de oro para el mineral del depósito aluvial, con un proceso de concentración en celda flash seguido por celda en columna. Para que sea factible la flotación de partículas más densas que el líquido, es preciso que la adherencia de las partículas a las burbujas de gas sea mayor que la tendencia a establecer un contacto entre las partículas y el líquido. Este contacto entre un sólido y un líquido se determinó mediante la medida del ángulo. El mayor valor de ángulo de contacto (95°), para la superficie de oro modificada con colector, se consiguió con DTPI y un tiempo de acondicionamiento de 20 minutos. Esto concuerda con los resultados de las pruebas de flotación, en las cuales se obtuvo las recuperaciones más altas usando el DTPI como colector y con un tiempo de acondicionamiento de 20 minutos. La actividad de una superficie mineral con relación a los reactivos de flotación en el agua depende de las fuerzas que actúan en la superficie. Con las medidas de AFM, se comprobó que el DTPI, modifica la energía superficial del oro, disminuyéndola a

En la tesis denominada “Estudio electroquímico de la interacción de superficies de cobre y enargita con colectores del tipo Tíol: Etilxantato y Dibutilditiocarbamato” se estudió y caracterizó la interacción de superficies electroquímicas de cobre y enargita natural con agentes colectores del tipo Tíol en medios electrolitos de acidez variable. Los agentes colectores considerados fueron etilxantato de potasio (KX) y dibutilditiocarbamato de potasio (DBDTCK). Para la interfase Cu/tampón borato pH 9.2, 1 mmx, se estudió el proceso de electro adsorción/electrodesorción de etilxantato, en un intervalo de potencial comprendido entre -1.1 v y -0.6 v. se determinó mediante estudios potenciodinámicos y de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE) que, durante el proceso de electroadsorción de xantato, tiene lugar en forma simultánea la reacción de evolución de hidrógeno (REH). De las medidas de Angulo de contacto de la interface, fue posible establecer que la electroadsorción de la especie xantato otorga un leve grado de hidrofobicidad a la superficie electroquímica. Del mismo modo, se estudió la interfase Cu/tampón fosfato pH 6.8 , 1 mm dibutilditiocarbamato (DBDTC). El estudio potenciodinámico estuvo comprendido en un intervalo de potencial entre -1.0 v y 0.50 v, mostrando la formación de Cu (DBDTC) 2, (DBDTC)2 y de especies de cobre que contienen oxígeno (oxo hidroxido compuestos). La presencia de unos u otros, sobre la superficie electroquímica es dependiente del valor de potencial aplicado a la interfase. Estos resultados fueron confirmados, complementariamente, con medidas espectroscópicas uv-vis, impedancia electroquímica y medidas de hidrofobicidad (ángulos de contacto). Para la interfase enargita / tampón borato pH 9.2, 1 mm etilxantato (x) se realizó un estudio potenciodinámico en un intervalo de potencial comprendido entre -0.1 v a 0.6 v. En esta región de potencial tienen lugar los procesos de electroadsorción (XADS), electroformación de la superficie dimerica (x₂) y la electroformación del compuesto metal - colector (CuX₂). la presencia de estas especies, al valor de potencial aplicado a la interface (0.015 v, 0,36 v y 0.55 v), fue confirmada por medidas de espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS) determinación por espectroscopia de absorción atómica (EAA) de las especies que pasan a la solución [Cu (ii) y As (v)], y de la carga eléctrica involucrada durante la polarización de esta interfase, permitió proponer una estequiometría para las reacciones electroquímicas de formación de las películas superficiales que contienen a los compuestos arriba indicados. En forma adicional, se realizó un estudio de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE) a los potenciales de polarización que permitieron establecer las superficies. De las medidas de Angulo de contacto de la interfase, fue posible establecer que la presencia de la especie electroadsorbida otorga

un alto grado de hidrofobicidad a la superficie electródica. Un estudio similar al descrito anteriormente se realizó con la interfase enargita / tampón fosfato pH 6.8, 1 mm DBDTC, en el intervalo de potencial de -0.3 v a 0.7 v. en este intervalo de potencial, tienen lugar la electroformación de las especies $\text{Cu}(\text{DBDTC})_2$ y $(\text{DBDTC})_2$. Los parámetros potenciodinámico de estos procesos permitieron establecer un mecanismo de electroformación para estas especies. A potenciales más positivos que 0.50 v se forman compuestos de cobre y arsénico que contienen oxígeno (oxo-hidroxo compuestos). Los resultados potenciodinámico se complementaron con experiencias de XPS, EAA, EIE y medidas de hidrofobicidad. Todo lo anterior permitió proponer una estequiometría para las reacciones electroquímicas de formación de las películas superficiales y un circuito eléctrico equivalente, acorde con los procesos electroquímicos interfaciales. Además se estableció, que la presencia de la especie colectora (X o DBDTC) en la solución electrolítica favorecen los procesos de oxidación de cobre y enargita, desplazándoles hacia potenciales menos positivos. También se estableció que en todos aquellos procesos electroquímicos que involucran a la especie colectora, la enargita se comportó como un sustrato electródica más noble que cobre (Grež, 2013).

Según el libro escrito por Chia, J. (2012), en su presentación: "Molienda y Clasificación en la Flotación de minerales" indica que el conocimiento de la característica de humectación de las superficies minerales es primordial para mejorar la eficiencia de separación de minerales valiosos de ganga, usando flotación espumante. El valor del ángulo de contacto es un indicador útil que proporciona la característica hidrofóbica en las superficies sólidas minerales, debido a una estrecha relación entre este parámetro y la flotabilidad de los minerales

En la presentación del libro Flotación de minerales, escrito por Sutulov, A. (2013), menciona que el éxito de la medida del ángulo de contacto sobre superficie planas, depende en gran medida de la calidad de la superficie y de su limpieza, en general estas medidas son difíciles e inciertas cuando el ángulo es menor a 20° , debido a la alta sensibilidad al error experimental.

En el libro introducción a la flotación de minerales, escrito por Astucuri (2014), indica que para superficies planas y sólidas, la técnica más utilizada para la medición del ángulo de contacto es una medida directa del ángulo, viendo el perfil de la gota. Un telescopio goniómetro se puede utilizar para ver la gota puesta en superficie plana y

medir el perfil del contacto. Una imagen de la gota en reposo ó de la adhesión de la burbuja se puede proyectar en una pantalla y trazar los contornos, midiéndose el ángulo con un transportador, esto se debe ir registrando permanentemente. La precisión se refuerza por el uso de aumentos relativamente altos (hasta 50 veces) que permiten el examen detallado de la intersección del perfil de caída y la superficie sólida.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Generalidades

La minería es uno de los sectores más importantes de la economía peruana y representa normalmente más del 50% de las exportaciones peruanas con cifras alrededor de los 14 mil millones de dólares al año (Azañero, 2016).

Los principales minerales que exporta nuestro país son: cobre, oro, hierro, plata, zinc y plomo entre otros. Actualmente todos ellos son fuertemente demandados como insumos para procesos industriales de alto nivel tecnológico. El Perú posee el 16% de las reservas de minerales conocidas, incluyéndole 15% de las de cobre y el 7% de las de zinc. Se estima que hasta el día de hoy el Perú únicamente ha extraído el 12% de sus recursos minerales y que con tecnología adecuada puede triplicar su actual producción, especialmente en metales básicos. Con la sostenible alza de los precios de los metales el Perú se ha posicionado ventajosamente en la minería mundial, manteniendo un liderazgo minero en Latinoamérica y una sólida historia y trayectoria minera (Cáceres, 2012).

2.2.2. Producción minero metalúrgica de cobre

La producción de cobre durante el año 2010 fue de 1'247,126 T.M.F., disminuyendo en 2.28% con relación a la del año 2009 (1'276,249 T.M.F). Esto se explica por las menores cifras reportadas por las empresas Xstrata, Tintaya, Antamina y Southern, cuya producción descendió en 13.26%, 5.63% y 5.54%, respectivamente, en comparación al 2009 (Herrerros & Medina, 2012).

Es de destacar el aumento de la producción que dieron cuenta Sociedad Minera El Brocal, Compañía Minera Milpo, Minera Pampa de Cobre y Gold Fields La Cima, cuya producción se incrementó en 84.33%, 18.04%, 15.01% y 12.97%,

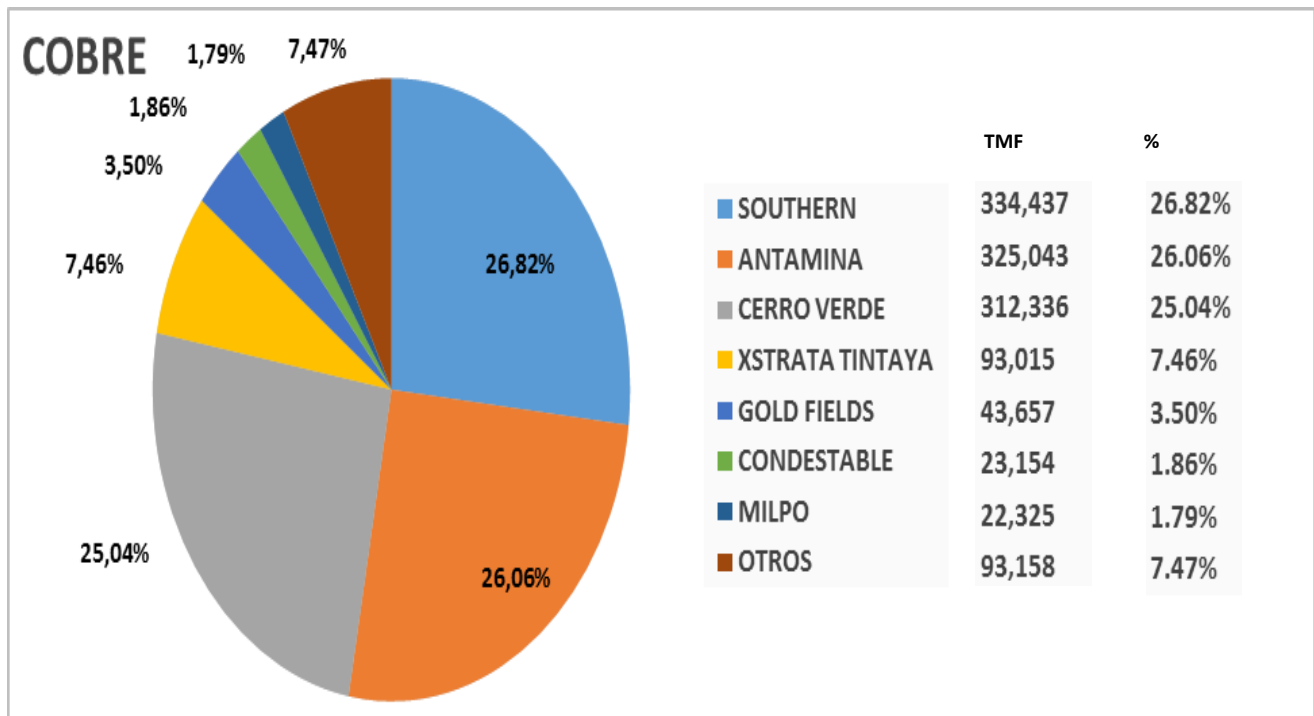
respectivamente. En diciembre, la producción fue de 115,171 T.M.F., mayor en 2.89% a la de similar mes del año 2009 (111,939 T.M.F.). Las cifras del año 2009 mostraron que Perú desplazó a Estados Unidos del segundo puesto en la clasificación mundial de producción de cobre que lidera Chile. Sin embargo con la próxima apertura de la minas Toromocho, Las Bambas y Antapacay el Perú cuadruplicara su producción de Cobre en los próximos años consolidara como un país líder y acortando distancia con el primer productor Chile. Con los ingentes recursos de cobre que posee el Perú, cuya exportación producirá la mayor cantidad de divisas para Perú, es la piedra angular de su crecimiento económico y desarrollo (Ballester, 2012).

TABLA N° 01. Producción de los principales metales en el Perú 2005 - 2014

Producto / Product	Unidad / Unit	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Cobre	Miles de TMF	1,010	1,048	1,190	1,268	1,268	1,247	1,235	1,299	1,376	1,380
Oro	Miles de OzF	6,687	6,521	5,473	5,783	5,919	5,275	5,343	5,194	5,024	4,500
Zinc	Miles de TMF	1,202	1,203	1,444	1,603	1,513	1,470	1,256	1,281	1,351	1,319
Plata	Miles de OzF	103,064	111,584	112,574	118,505	126,118	117,043	109,919	111,912	115,935	121,459
Plomo	Miles de TMF	319	313	329	345	302	262	230	249	266	278
Hierro	Miles de TMF	4,565	4,785	5,104	5,161	4,419	6,043	7,011	6,685	6,681	7,193
Estaño	Miles de TMF	42	38	39	39	38	34	29	26	24	23
Molibdeno	Miles de TMF	18	18	16	16	12	17	19	17	18	17

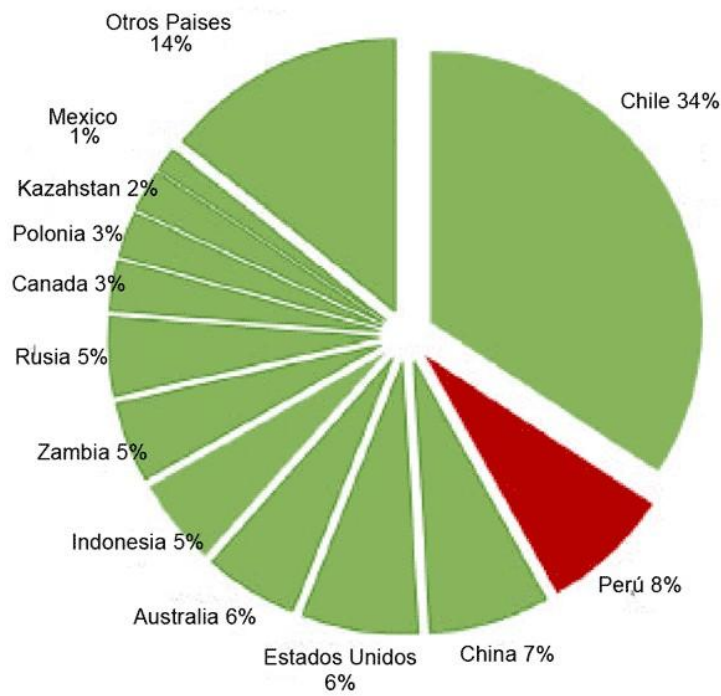
Fuente: (Luna, 2016)

FIGURA N° 01. Producción Metálica en el 2010 por participación por empresas mineras.



Fuente: (Luna, 2016)

FIGURA N° 02. Gráfica Ranking Mundial del Cobre 2010.



Fuente: (Luna, 2016)

FIGURA N° 03. Precio Internacional del Cobre, desde junio 2012 hasta marzo 2017.



Fuente: (Infomine, 2017)

2.2.3. Cobre

La mayor parte del cobre del mundo se obtiene de los sulfuros minerales como la calcocita, covelita, calcopirita, bornita y enargita. Los minerales oxidados son la cuprita, tenorita, malaquita, azurita, crisocola y brocantita. El cobre nativo, antes abundante en Estados Unidos, se extrae ahora sólo en Michigan. El grado del mineral empleado en la producción de cobre ha ido disminuyendo regularmente, conforme se han agotado los minerales más ricos y ha crecido la demanda de cobre. Hay grandes cantidades de cobre en la Tierra para uso futuro si se utilizan los minerales de los grados más bajos, y no hay probabilidad de que se agoten durante un largo periodo (Bartlett, 2012).

El cobre es el primer elemento del subgrupo Ib de la tabla periódica y también incluye los otros metales de acuñación, plata y oro. Su átomo tiene la estructura electrónica $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^1$. El bajo potencial de ionización del electrón $4s^1$ da por resultado una remoción fácil del mismo para obtener cobre(I), o ion cuproso, Cu^+ , y el cobre(II), o ion cúprico, Cu^{2+} , se forma sin dificultad por remoción de un electrón de la capa 3d. El peso atómico del cobre es 63.546. Tiene dos isótopos naturales estables ^{63}Cu y ^{65}Cu . También se conocen

nueve isótopos inestables (radiactivos). El cobre se caracteriza por su baja actividad química. Se combina químicamente en alguno de sus posibles estados de valencia. La valencia más común es la de 2+ (cúprico), pero 1+ (cuproso) es también frecuente; la valencia 3+ ocurre sólo en unos cuantos compuestos inestables (Zbigniew, 2014).

Un metal comparativamente pesado, el cobre sólido puro, tiene una densidad de 8.96 g/cm³ a 20 °C, mientras que el del tipo comercial varía con el método de manufactura, oscilando entre 8.90 y 8.94. El punto de fusión del cobre es de 1083.0 °C. Su punto de ebullición normal es de 2595 °C. El cobre no es magnético; ó más exactamente, es un poco paramagnético. Su conductividad térmica y eléctrica son muy altas. Es uno de los metales que puede tenerse en estado más puro, es moderadamente duro, es tenaz en extremo y resistente al desgaste. La fuerza del cobre está acompañada de una alta ductilidad. Las propiedades mecánicas y eléctricas de un metal dependen en gran medida de las condiciones físicas, temperatura y tamaño de grano del metal (Biswas & Davenport, 2012).

TABLA N° 02. Propiedades químicas del cobre

Numero Atómico	29
Valencia	1,2
Estado de oxidación	+2
Electronegatividad	1,9
Radio covalente (A)	1,38
Radio iónico (A)	0,69
Radio atómico (A)	1,28
Configuración electrónica	[Ar]3d ¹⁰ 4S ¹
Peso atómico (g/mol)	63,54
Densidad (g/ml)	8,96
Punto de fusión (°C)	1083
Punto de ebullición (°C)	2595

Fuente: (Tantalean, 2013)

2.2.4. Especies minerales comerciales de cobre

Las especies minerales de cobre en la mayoría de los casos determinan el procedimiento y el proceso en la planta. Las especies comerciales tienen características físicas que las hacen fácilmente identificables.

TABLA N° 03. Especies minerales comerciales del cobre

Sulfurados		Oxidados		Nativo
Chalcosita	Cu_2S	Malaquita	$\text{CuCO}_3(\text{OH})_2$	Cu
Covelita	CuS	Azurita	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	
Calcopirita	CuFeS_2	Crisocola	$\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	
Bornita	Cu_3FeS_3	Cuprita	Cu_2O	
Enargita	Cu_3FeS_4	Tenorita	CuO	
Tenantita	Cu_3FeS_3	Chalcantita	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	
Fematinita	Cu_3FeS_4	Brochantita	$\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$	
Tetraedrita	Cu_2FeS_3	Acatamita	$\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})$	

Fuente: (Tantalean, 2013)

En las plantas metalúrgicas llegan los tipos de minerales que a continuación se mencionan: sulfuros, sulfuros parcialmente oxidados, mixtos de sulfuros de óxidos (sulfoxidados), óxidos con traza de sulfuros, óxidos puros.

Cada yacimiento y con mayor razón las plantas tienen a su vez subclasificaciones y denominaciones para esos tipos en función de las impurezas, etc. Lógicamente las gangas determinan el procedimiento y el proceso conjuntamente con las especies de cobre. El mayor porcentaje de la producción mundial proviene de las especies minerales sulfuradas (Tantalean, 2013).

2.2.5. Metalurgia del cobre

A pesar de las intensas investigaciones que se hacen a nivel mundial para aplicar la hidrometalurgia en la extracción del cobre, todavía sigue obteniéndose cerca el 90% por procesos pirometalúrgicos. La mayoría de los intentos que se han hecho en este sentido no ha obtenido éxito significativo con la finalidad de disolverlo a la temperatura y presión ambiental; igualmente se han aplicado las variables de presión y temperatura últimamente sin llegar a conclusiones industriales masivas. Mientras que los procesos

Hidrometalúrgicos en los últimos 30 años han tenido impresionantes avances, tanto con fines de minimizar costos y la polución ambiental (Bray, 2015)

A. Pirometalurgia

1. El convencional o general (Tostación-fundición-conversión electrorefinación)
2. Fundición instantánea (flash smelting).
3. Segregación
4. Obtención de mata de Horno de Cuba.
5. Obtención de mata en Horno Eléctrico.
6. Por reacción ciclónica (fase experimental)

Existen variantes a los procedimientos indicados, como es la utilización de “concentradores verdes” en el horno de Reverbero, esto es sin previa tostación (Terkel, 2012).

B. Hidrometalurgia

1. Lixiviación con soluciones de ácido sulfúrico con variantes:
 - a. Natural
 - b. In situ
 - c. En montones y pilas (Heap Leaching)
 - d. En percoladores

- e. En agitadores mecánicos y neumáticos.
2. Lixiviación con soluciones de ácido sulfúrico más sulfato férrico.
3. Lixiviación – precipitación – flotación (LPF).
4. Extracción por solventes
5. Bio-lixiviación
6. Con soluciones amoniacaes
7. A temperaturas moderadas y a presión (en investigación para minerales específicos)
8. Con ácido clorhídrico (en investigación)
9. Con cianuro (en investigación) (Dixon, Baxter, & Sylwestrzak, 2014)

2.2.6. Usos del cobre

A. En la industria de las comunicaciones y manufacturera

Es empleado en la fabricación de tubos, por su gran ductibilidad, su gran conductividad térmica y relativa resistencia a la corrosión.

Tiene gran demanda en la fabricación de cables y alambres eléctricos, por su alta conductividad eléctrica. En forma de óxido de cobre se emplea como pigmento en la fabricación de pinturas. En artesanía, se tiene una antigua tradición (Posadas, 2014).

B. En la agricultura e industria de la construcción

El sulfato de cobre se produce a partir de chatarra o mineral oxidado de cobre con la adición de ácido sulfúrico para la formación de sulfato de cobre en solución, el cual es purificado, saturado y luego precipitado para formar cristales, usado en agricultura, minería y medicina.

El oxiclورو, es empleado como desinfectante, y el óxido cuprosos es base de pinturas (Garrels & Christ, 2015).

C. Aleaciones

Los Latones. Son aleaciones de cobre con zinc. Se utilizan para cartuchos de municiones, en los radiadores, accesorios para plomería, joyería de fantasía, intercambiadores de calor, estuches para lápiz labial, polveras, etc.

Los bronces son aleaciones de cobre con otros metales (Sn, Al, etc.) excepto el zinc. Se usa en la fabricación de discos de embrague, resortes, fuelles, recipientes y conductos hidráulicos a presión, engranajes, ejes motrices, piezas de bombas, resortes y contactos en equipos para teléfonos, equipo quirúrgico y dental, etc (Pérez, 2014).

2.2.7. Purificación y concentración de la solución lixiviada

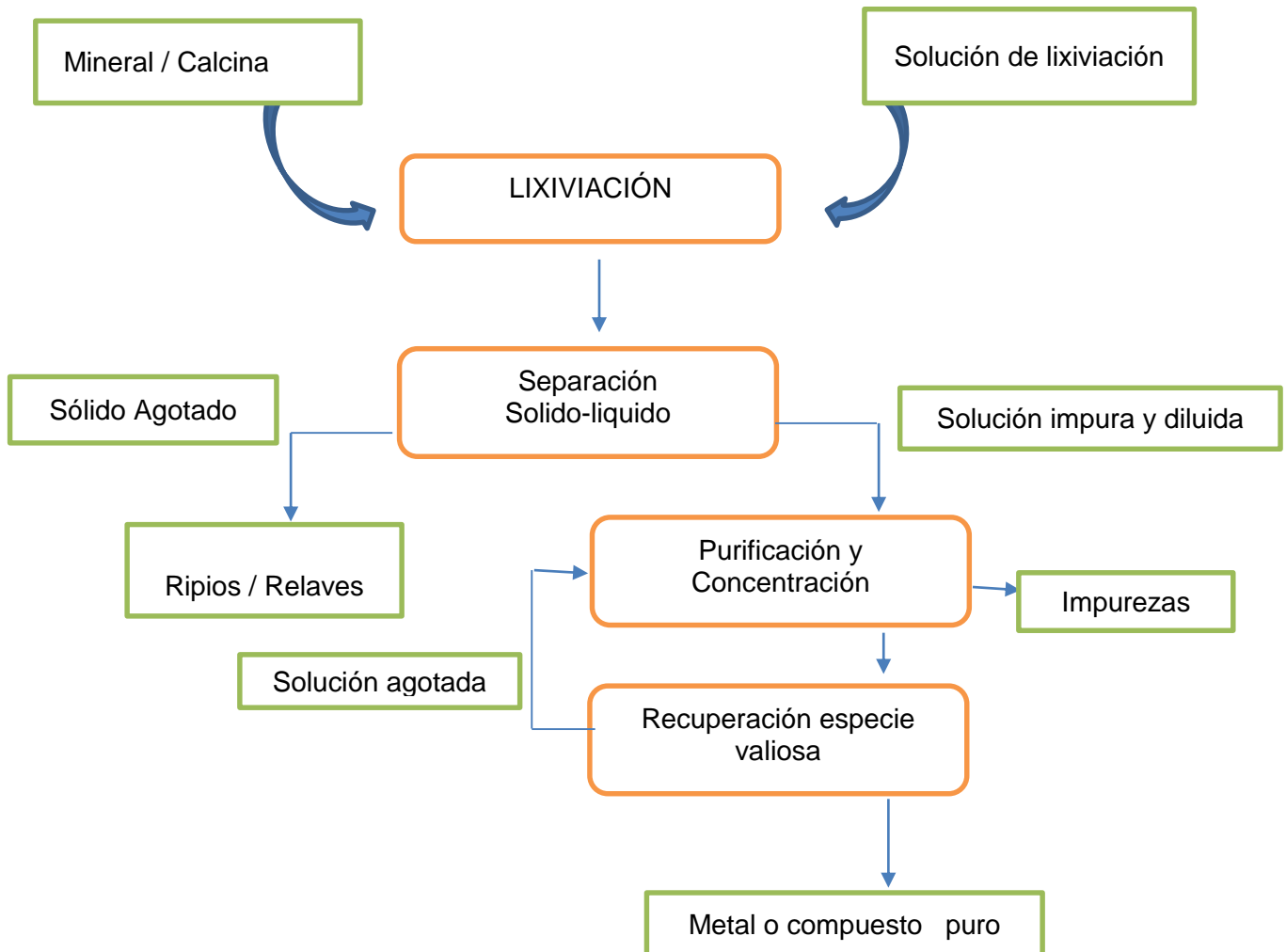
En el proceso de purificación o de concentración, existen dos fases en contacto (líquido - sólido ó líquido - líquido). Se trata de un proceso de: purificación si la impureza va a la otra fase y concentración si el elemento deseado va a la otra fase.

Los procesos de purificación y/o concentración son muy variados y dependen de: la naturaleza del elemento deseado, las impurezas presentes en la solución, el tipo de proceso de recuperación, el grado de pureza deseado para el producto final.

Los procesos de purificación y/o concentración se pueden dividir en varias categorías: hidrólisis, cementación, precipitación de un compuesto específico, extracción por solventes, resinas de intercambio iónico

Al evaluar un proceso de separación, los criterios son la selectividad de la separación, la recuperación (o grado de remoción) y el consumo de reactivos (o de Energía), estos tres parámetros están intercorrelacionados y se necesita hacer la evaluación económica del proceso que se desea utilizar (Guzmán, 2013).

FIGURA N° 04. Esquema general del tratamiento hidrometalúrgico de un mineral.



Fuente: (Guzmán, 2013)

2.2.8. Hidrofobicidad

El efecto hidrófobo representa la tendencia del agua a excluir moléculas no polares. El efecto se origina a partir de la ruptura de los enlaces de hidrógeno altamente dinámicas entre moléculas de agua líquida. Grupos químicos polares, tales como grupo OH en metanol no causan el efecto hidrófobo. Sin embargo, una molécula de hidrocarburo puro, por ejemplo hexano, no puede aceptar o donar enlaces de hidrógeno con el agua. Introducción de hexano en el agua provoca la interrupción de la red de enlaces de hidrógeno entre las moléculas de agua. Los enlaces de hidrógeno son parcialmente reconstruidos mediante la construcción de un agua "jaula" alrededor de la molécula de hexano, similar a la de hidratos de clatrato formadas a temperaturas más bajas. La movilidad de las moléculas de agua en la "jaula" está fuertemente restringida. Esto conduce a pérdidas significativas en la entropía traslacional y rotacional de las moléculas de agua y hace que el proceso desfavorable en términos de energía libre del sistema.

La hidrofobicidad del mineral es la que permite la adherencia de las partículas sólidas a las burbujas de aire provenientes del proceso de flotación.

El conocimiento de la característica de humectación de las superficies minerales es primordial para mejorar la eficiencia de separación de minerales valiosos de ganga, usando flotación espumante. El valor del ángulo de contacto es un indicador útil que proporciona la característica hidrofóbica en las superficies sólidas minerales, debido a una estrecha relación entre este parámetro y la flotabilidad de los minerales.

El éxito de la medida del ángulo de contacto sobre superficie planas, depende en gran medida de la calidad de la superficie y de su limpieza, en general estas medidas son difíciles e inciertas cuando el ángulo es menor a 20° , debido a la alta sensibilidad al error experimental.

Para superficies planas y sólidas, la técnica más utilizada para la medición del ángulo de contacto es una medida directa del ángulo, viendo el perfil de la gota. Un telescopio goniómetro se puede utilizar para ver la gota puesta en superficie plana y medir el perfil del contacto. Una imagen de la gota en reposo ó de la adhesión de la burbuja se puede proyectar en una pantalla y trazar los contornos, midiéndose el ángulo con un transportador, esto se debe ir registrando permanentemente. La precisión se refuerza por el uso de aumentos relativamente altos (hasta 50 veces) que permiten el examen detallado de la intersección del perfil de caída y la superficie sólida (Chau, Bruckard, Koh, & Nguyen, 2012).

2.2.9. Flotación

La concentración por flotación es una técnica que aprovecha la diferencia entre las propiedades superficiales o interfaciales del mineral, o especies de valor, y la ganga. Se basa en la adhesión de algunos sólidos a burbujas de gas generadas en la pulpa por algún medio externo, en la celda de flotación.

Las burbujas de aire transportan los sólidos a la superficie donde son recolectados y recuperados como concentrado. La fracción que no se adhiere a las burbujas permanece en la pulpa y constituye la cola o relave (Reyes, 2015).

La flotación de minerales, es usada para separar o concentrar minerales y otras especies químicas. La separación por flotación es el resultado de fenómenos fisicoquímicos complejos que ocurren en las interfases sólido/líquido,

líquido/gas y sólido/gas. La flotación depende de la probabilidad de unión de la partícula a la burbuja en la celda de flotación, la cual es determinada por la capacidad de los sólidos (reducidos en tamaño) de hidratarse (condiciones eléctricas por polaridad). Como ejemplo vamos a explicar uno de los fenómenos, las superficies de las partículas sólidas sumergidas en el agua son objeto de hidratación, por las características eléctricas que existen en la superficie, después de su creación, se ha comprobado que las trizaduras y desórdenes iónicos aumentan la hidratación.

Al contrario de con los que se rompen según el plano de clivaje y donde en consecuencia no hay rompimiento de enlaces químicos, por ejemplo la molibdenita (Pavez, 2016).

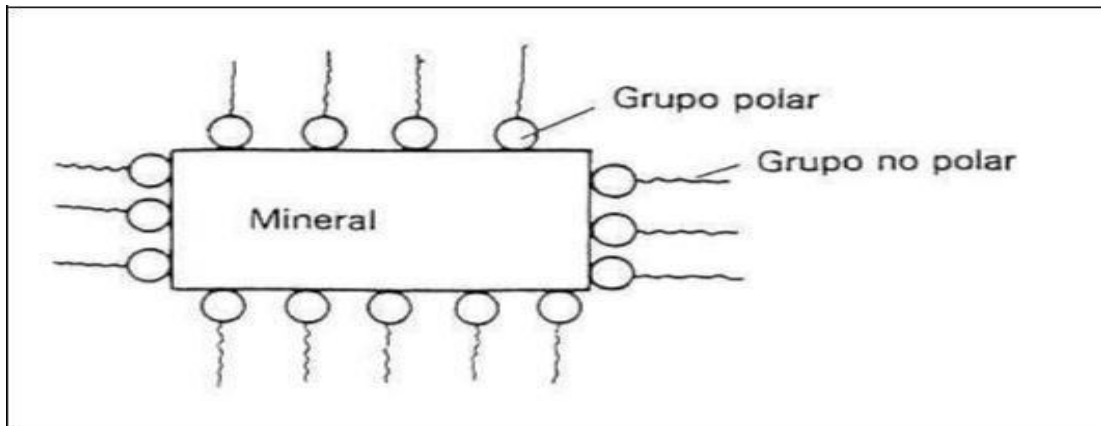
Así mismo, entre la superficie del mineral y el agua se formará una capa eléctrica, cuyo nombre es el Potencial Electroquímico.

De esta manera se forma la doble capa de cargas eléctricas. ¿Por qué es importante la doble capa de cargas eléctricas en los fenómenos de la flotación? Porque influye directamente en la absorción de los reactivos sobre la superficie del mineral. Su existencia no solo dirige los fenómenos de hidratación, sino que también la absorción de líquidos orgánicos que sirven como colectores y espumante (Concentración de minerales, 2013).

La condición de flotabilidad es una fuerte adhesión entre las partículas útiles y las burbujas, las cuales deben ser capaces de soportar la agitación y turbulencia en la celda. Estas partículas se dice incorrectamente que son repelentes al agua, debido a su capacidad de hidratarse y formar su doble capa eléctrica, dichas partículas polarizadas en su superficie interactúan por medio de las fuerzas de Vander Waals y de London con la parte polar de los colectores, y estos colectores a su vez por medio de su composición apolar forma y da estabilidad a las burbujas conjuntamente con los espumantes, ocasionado que las burbujas transporten a la superficie a los colectores unidos por medio de las fuerzas de van der waals a las partículas de valor. Al contrario de las partículas que constituyen el relave o cola, que no tienen la capacidad de formar su doble capa eléctrica. Como se puede observar en figura 2 (Cuadros, 2012).

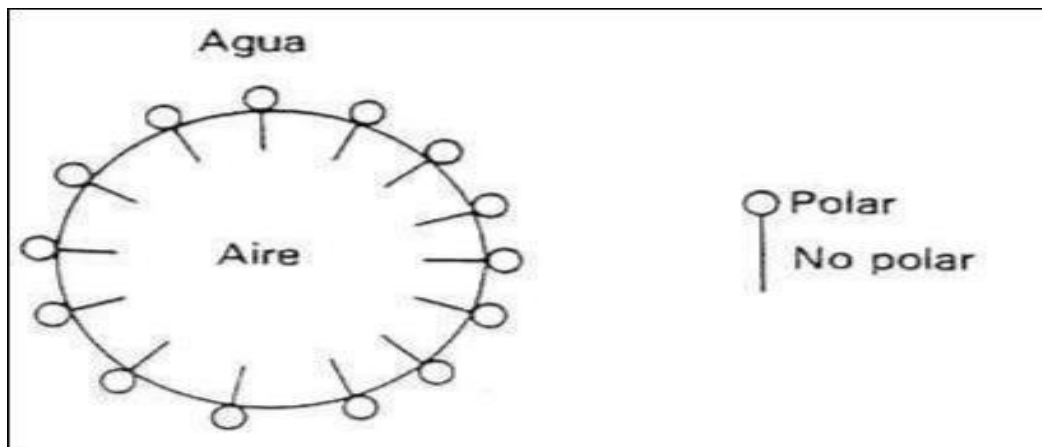
En la figura 05 se muestra la adsorción del colector sobre la superficie de un mineral, mientras que, la acción de un espumante se presenta en la figura 07.

FIGURA N° 05. Adsorción de un colector en la superficie de un espumante



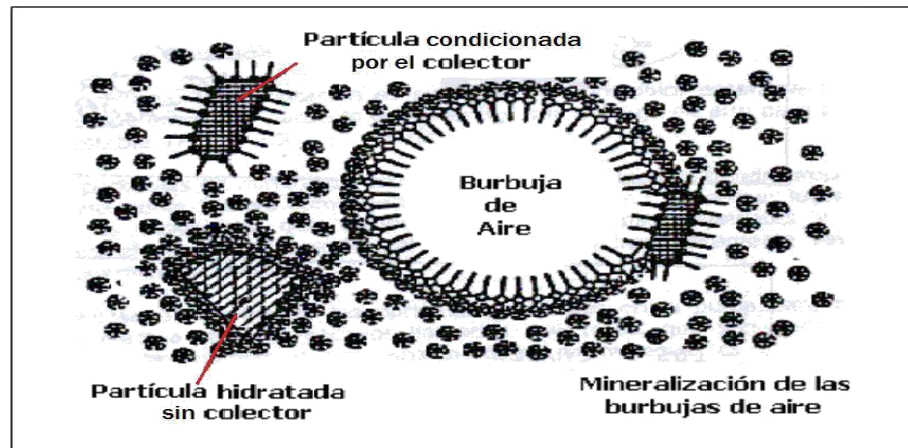
Fuente: (Pavez, 2016).

FIGURA N° 06. Acción de un espumante



Fuente: (Pavez, 2016)

FIGURA N° 07. Mecanismo de flotación por espuma



Fuente: (Pavez, 2016).

Para lograr una buena concentración en la etapa de limpieza del concentrado se requiere que las especies útiles que constituyen la mena estén separadas o liberadas, esta la liberación de las partículas útiles no es necesaria en la etapa primaria de flotación (etapa Rougher). La liberación de las partículas se consigue con etapas de molienda o remolienda. Para la mayoría de los minerales se alcanza un adecuado grado de liberación moliendo la mena a tamaños del orden de $-100\ \mu\text{m}$ o $-74\ \mu\text{m}$.

La flotación, de esta forma, está gobernado por una gran cantidad de variables las que interactúan entre sí, y cuyo conocimiento contribuirá a comprender mejor esta técnica en sí y obtener finalmente un mejor rendimiento en las aplicaciones prácticas.

Al contrario de otros métodos de concentración, en la flotación es posible variar la diferencia entre las propiedades útiles y la ganga, modificando el ambiente químico y electroquímico del sistema mediante la adecuada selección de los reactivos químicos adicionados: colectores, espumantes, activadores, depresores o modificadores de pH.

2.2.10. Naturaleza física de superficies

En toda porción de materia existen fuerzas intermoleculares que en cierta forma mantienen unidas las moléculas que la componen. Si se considera una molécula ubicada en el seno de un líquido, ésta estará rodeada de moléculas de su misma naturaleza, por lo cual las fuerzas de atracción intermoleculares se compensan produciéndose un equilibrio energético. Es decir, las moléculas superficiales tienen una mayor energía que aquellas ubicadas en el seno del líquido. La magnitud del desbalance de energía que se produce depende de la naturaleza de las interacciones moleculares. A este exceso de energía se denomina energía libre superficial. Por lo tanto, aumentar el área superficial de una cierta masa de líquido significa, entregar energía al sistema en forma de trabajo. Así, la expresión de la tensión superficial será la siguiente:

$$\gamma = \left(\frac{\partial G}{\partial A} \right)_{p,T,n} \longrightarrow \gamma = G^S$$

Donde:

γ : Tensión superficial, con unidades de energía/área o fuerza/longitud

G^S : Energía libre superficial

A: área interfacial

p: Presión

T: Temperatura

n: Numero de moles presentes en el sistema

En consecuencia, la tensión superficial es la medida del trabajo requerido para aumentar la superficie en una unidad de área, a presión, temperatura y masa constantes.

La magnitud de la tensión superficial está directamente relacionada con la magnitud de las fuerzas intermoleculares. Por lo tanto, si se conoce la naturaleza química del líquido, es posible estimar el orden de magnitud de su tensión superficial.

Las interacciones moleculares más frecuentes, en orden creciente de su unión, son: fuerzas de London, fuerzas de Van der Waals o fuerzas de dispersión; interacciones dipolo-dipolo inducido, interacciones dipolo-dipolo, enlace de hidrógeno.

Las fuerzas de dispersión son fuerzas atractivas débiles existentes en toda materia, independiente de su naturaleza química y tienen su origen en los llamados dipolos inducidos

2.2.11. Adsorción

La flotación es un fenómeno físico químico que involucra el estudio de las propiedades de las interfases. Una de las formas de caracterizar una interfase es por la medida de la adsorción.

La adsorción puede definirse como la concentración de una entidad química (iones y moléculas) en una interfase. Generalmente se expresa en moles o moléculas de adsorbido por área de interfase. Es un fenómeno espontáneo y exotérmico. Es común la clasificación de la adsorción, con base en la naturaleza de la interacción adsorbido/adsorbente, en adsorción física (fisorción) y adsorción química (quimisorción).

La adsorción física es resultante de interacciones químicas secundarias o residuales (tipo Van der Waals), caracterizándose por un bajo calor de interacción, ninguna o casi ninguna acción de selección entre el adsorbente y el adsorbido, siendo posible la formación de multicapas. La adsorción química se debe a interacciones químicas primarias (por ejemplo, covalentes) entre el adsorbente y el adsorbido. Existe selectividad, formándose compuestos de superficie. Apenas una camada puede ser adsorbida.

La adsorción puede caracterizarse en relación a la especificidad entre el adsorbido y el adsorbente. Adsorción no específica ocurre en respuesta a la atracción puramente electrostática. Es rápida y rápidamente reversible, no pudiendo revertir el signo de la carga original del adsorbente. En la adsorción específica, la contribución electrostática puede ser irrelevante y especies adsorbidas específicamente pueden aumentar, reducir, anular o revertir la carga original del adsorbente. Es relativamente lenta e irreversible.

Varios factores pueden contribuir al proceso de adsorción, tales como, atracción electrostática, enlace covalente, enlace puente hidrógeno, interacciones no polares entre el adsorbato y especies interfaciales, interacciones laterales entre las especies adsorbidas (Pavez, 2016).

2.2.12. Termodinámica de la flotación

Para que en la práctica ocurra la adhesión entre una burbuja y una partícula mineral, deben cumplirse condiciones termodinámicas a la vez que hidrodinámicas.

En primer lugar debe ocurrir un encuentro físico entre la partícula y la burbuja (colisión). Para que dicha colisión sea exitosa se requiere que durante el corto tiempo que dura la colisión, tenga lugar el adelgazamiento y ruptura del film de líquido que los separa y se forme una nueva interfase mineral/aire. Tanto la espontaneidad con que ocurra esta etapa, así como, la estabilidad en el tiempo de esta adhesión, dependen de la capacidad de la partícula de mineral de hidratarse y formar su doble capa eléctrica, para así poder unirse (por fuerzas de van der Waals) a los colectores y lograr la flotación.

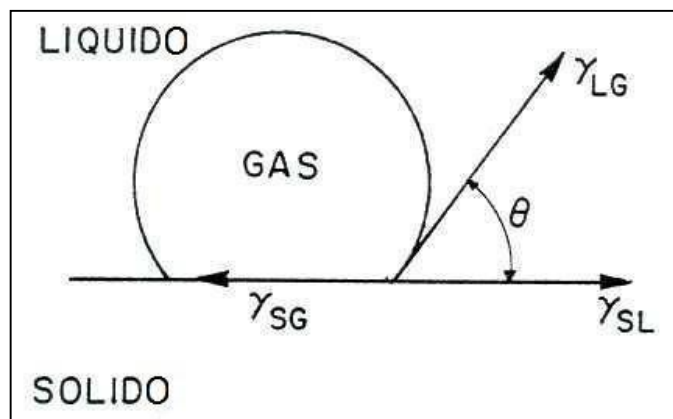
Durante la adhesión hay un efecto cinético importante. Hay un tiempo mínimo necesario para que ocurra una adhesión estable, llamado tiempo de inducción. Lógicamente, en la flotación se requiere que el tiempo de inducción sea menor que el tiempo de duración de la colisión. Durante este corto lapso de tiempo debe ocurrir el reemplazo de la interfase mineral/solución por la interfase mineral/gas, lo cual involucra vencer ciertas fuerzas de oposición que surgen de la energía superficial del agua dispersa en un film muy delgado que a su vez es función de la afinidad con la superficie mineral. La flotación es básicamente la adhesión de una partícula mineral, con bajas condiciones de flotabilidad, a una burbuja de gas por medio de colectores. La propiedad que impide que el tiempo de inducción (adhesión estable) sea menor al tiempo que dura la colisión es la tensión superficial.

Para el análisis de la espontaneidad de la adhesión y ante la falta de técnicas adecuadas para medir experimentalmente las tensiones interfaciales sólido/gas y sólido/líquido, se recurre a la ecuación de Young. Esto último define un

parámetro medible vinculado a la adhesión estable entre partícula y burbuja de aire, que es el ángulo de contacto, en función de las tensiones interfaciales.

En el año 1805 Thomas Young propuso tratar el ángulo de contacto de una gota de líquido colocada sobre una superficie sólida plana, como un equilibrio mecánico de las tensiones interfaciales sólido/líquido, sólido/gas y líquido/gas (Rubio, 2013)

FIGURA N° 08. Angulo de contacto en un sólido



Fuente: (Chía, 2012).

2.2.13. Cinética de la flotación

Ya que en la flotación estamos en presencia de fenómenos físico-químicos, conviene tener presente que tanto las reacciones de acondicionamiento (mineral versus reactivos colectores/modificadores) como las de flotación propiamente tales (superficies acondicionadas de mineral versus burbujas de aire) tienen cinética definida, por ejemplo requieren de un lapso de tiempo mas o menos prolongado para llevarse a cabo.

En los dos casos, la cinética se expresa por la ley de acción de las masas (o principio de Gulderg y Waage). Que a su vez se basa en el concepto probabilístico de calcular la probabilidad de que una partícula de mineral se encuentre respectivamente con una molécula de reactivo colector, o con una burbuja de aire, según sea el caso.

Para apreciar la eficiencia de la flotación es necesario determinar su velocidad y selectividad, con que flotan las partículas minerales, o sea, es la recuperación de especies minerales en la espuma en relación con el tiempo.

En la flotación dentro de un solo experimento que dura varios minutos participan normalmente centenares de millones de burbujas, básicamente vamos a explicar el proceso en el laboratorio metalúrgico.

FIGURA N° 09. Curva: % de Recuperación vs. Tiempo de flotación.



Fuente: (Concentración de minerales, 2013)

Una de las técnicas más precisas está basada en la determinación de la velocidad de flotación de resultados de flotación parcial, en que las espumas producidas se captan luego de intervalos de tiempo iguales y se transfieren a vasos separados.

Luego se pesan las porciones de espuma de cada vaso lo que permitirá calcular una serie de resultados. Los resultados de flotación fraccional se llevan a un gráfico de coordenadas que muestran los cambios de las cantidades de partículas que pasan a las espumas en cada intervalo de tiempo con relación a las partículas sujetas a la flotación, presentes en la pulpa al comienzo del proceso (Concentración de minerales, 2013)

2.2.14. Variables de la flotación

Las variables que más afectan la flotación de los minerales son las siguientes: granulometría de la mena, tipo y dosificación de reactivos de flotación, densidad de la pulpa o porcentaje de sólidos, pH.

a) Densidad de pulpa o porcentaje de sólidos

La densidad de la pulpa o porcentaje de sólidos en la flotación de minerales viene determinada desde la etapa de molienda/clasificación. Es raro que la pulpa se ajuste en su porcentaje de sólidos antes de entrar a la etapa de flotación, sin embargo, es un factor importante, ya que la flotación de los minerales ocurre en forma eficiente cuando la pulpa presenta un valor adecuado de porcentaje de sólidos.

La densidad de pulpa afecta el tiempo de residencia del mineral en las etapas de flotación, y de esta forma en la capacidad del circuito. En general, la etapa de flotación rougher de las plantas concentradoras de cobre opera con un porcentaje de sólidos comprendido entre 30% y 45%, mientras que, las etapas de limpieza (cleaner y recleaner) trabajan con un porcentaje de sólidos menor (Pavez, 2016).

b) Potencial de hidrógeno o pH

El pH es la variable de control más utilizada en la flotación, ya que resulta fundamental en la recuperación y selectividad, así como, en la depresión de minerales. En la flotación es sumamente sensible al pH, especialmente cuando se trata de flotación selectiva. Los reactivos de flotación, principalmente los colectores, operan mejor en ciertos rangos de pH. La regulación del pH en la flotación de cobre se realiza con cal. Este reactivo es importante, ya que, además de actuar como modificador de pH, es un depresor de pirita en la flotación selectiva de minerales de cobre en la etapa de limpieza.

La flotación se hace generalmente en disoluciones ligeramente ácidas o alcalinas, con un pH comprendido entre 4 y 11 y es muy difícil mantener constante el valor del pH porque es imposible en la práctica regular exactamente las adiciones ácidas o bases, bastando muy pequeñas cantidades de reactivos ácidos o bases para cambiar considerablemente el pH.

La influencia es debido a su acción sobre las sales disueltas en la pulpa de flotación o procedente de disolución del mineral, cambiando completamente la reacción entre ellos o alterando la solubilidad de los minerales y de sus productos de descomposición, o modificando las reacciones entre minerales y reactivos alterando la acción superficial y la adsorción de los reactivos.

Se han hecho innumerables investigaciones sobre la influencia del pH en la flotación de los minerales, sin que se haya podido establecer reglas de carácter general, pues se ha comprobado que un mineral puede flotar bien lo mismo en una pulpa ácida o básica, o en una u otra.

A veces como ocurre con el carbón y el azufre, la flotación se hace mejor en la pulpa neutra, por lo tanto pues conviene indagarse, con ensayos y pruebas de investigación cuál es el pH más conveniente y su exacta determinación depende que el rendimiento sea mayor. No solo interesa el pH sino el reactivo que ha producido ese pH (Rubio, 2013)

c) Granulometría de la Mena.

Existe un tamaño de partícula que presenta una mayor recuperación metalúrgica, observándose, en general, una disminución de ésta para tamaños más gruesos y más finos de la mena. La recuperación disminuye para tamaños pequeños, lo cual se relaciona con la dificultad de adhesión partícula/burbuja, dado a que éstas no adquieren la energía cinética suficiente para producir un agregado partícula/burbuja estable. Por otra parte, las partículas pequeñas son arrastradas más fácilmente a la espuma, ya que el drenaje a la pulpa se favorece con el incremento de la velocidad de sedimentación.

Es importante destacar que, en la etapa de flotación primaria (etapa rougher) la flotación se realiza con una granulometría de mena en la cual no es necesaria la liberación de la partícula, sin embargo, en la etapa de limpieza donde es

necesaria la selectividad de las partículas útiles, es fundamental realizar una remolienda del concentrado de la etapa rougher para la liberación de las especies útiles de la mena.

De esta manera, el tamaño de partícula es la variable sobre la cual debe ponerse más énfasis en su control, debido a su efecto en la recuperación metalúrgica y en la selectividad del concentrado final, así como, por la alta incidencia que tiene en los costos de operación del proceso global de concentración (Chía, 2012).

d) Tipo y dosificación de los reactivos en la flotación.

La función del colector es adherir la partícula de mineral a la burbuja mediante enlaces de van der Waals y de London por lo cual, es el reactivo químico más importante utilizado en la flotación. La amplia experiencia existente en la flotación de minerales permite usar con eficiencia determinados tipos de colectores dependiendo de los tipos de minerales y asociaciones mineralógicas presentes.

Por otro lado, la elección de un espumante determina las características de la espuma, que contribuye a la selectividad de la operación. La altura de la espuma y el flujo de aire a la celda afectan el tiempo de retención de las partículas en la espuma. La estabilidad de la espuma depende principalmente de la dosificación del espumante.

Se debe tener en cuenta, que los reactivos de flotación requieren de un cierto tiempo de acondicionamiento para estar en contacto con la pulpa y de esa forma poder actuar en forma eficiente sobre las especies útiles de la mena. Así, la etapa de acondicionamiento adquiere mucha importancia, ya que algunos reactivos se deben adicionar en la etapa de molienda para tener mayor contacto con la mena, mientras que otros, se adicionan directamente al cajón de descarga de los molinos de bolas o al acondicionador (Pavez, 2016).

2.2.15. Reactivos de flotación

Los reactivos de flotación juegan un papel importante en este proceso. Estos al ser añadidos al sistema cumplen determinadas funciones que hacen posible la separación de los minerales valiosos de la ganga. Sin embargo la aplicación adecuada de estos reactivos no siempre resulta una tarea fácil debido a una serie de dificultades técnicas que se presentan durante el proceso. En flotación el rendimiento de los reactivos, sean colectores o espumantes, depende mucho de la composición y constitución mineralógica de la mena. Los reactivos utilizados para el acondicionamiento favorable del proceso, constituyen los llamados Agentes de Flotación. La selección y combinación apropiada de los mismos para cada tipo de mineral particular, constituye precisamente el principal problema del metalurgista a cargo de la operación.

2.2.14.1. Clasificación de los reactivos

Los reactivos o agentes de flotación se clasifican en:

a) Espumante

Tienen como propósito la creación de una espuma capaz de mantener las burbujas cargadas de mineral hasta su extracción de la máquina de flotación (celdas).

b) Colector

Es el reactivo fundamental del proceso de flotación puesto que produce la película hidrofóbica sobre la partícula del mineral.

c) Modificadores

Actúan como depresores, activadores, reguladores de pH, dispersores, etc. Facilitando la acción del colector para flotar el mineral de valor, evitando su acción a todos los otros minerales como es la ganga (Bravo, 2012)

23. Definición de términos básicos

Hidrofobicidad: El efecto hidrófobo representa la tendencia del agua a excluir moléculas no polares. El efecto se origina a partir de la ruptura de los enlaces de hidrógeno altamente dinámicos entre moléculas de agua líquida. Grupos químicos polares, tales como grupo OH en metanol no causan el efecto hidrófobo. Sin embargo, una molécula de hidrocarburo puro, por ejemplo hexano, no puede aceptar o donar enlaces de hidrógeno con el agua. Introducción de hexano en el agua provoca la interrupción de la red de enlaces de hidrógeno entre las moléculas de agua. Los enlaces de hidrógeno son parcialmente reconstruidos mediante la construcción de un agua "jaula" alrededor de la molécula de hexano, similar a la de hidratos de clatrato formados a temperaturas más bajas. La movilidad de las moléculas de agua en la "jaula" está fuertemente restringida. Esto conduce a pérdidas significativas en la entropía traslacional y rotacional de las moléculas de agua y hace que el proceso desfavorable en términos de energía libre del sistema. La hidrofobicidad del mineral es la que permite la adherencia de las partículas sólidas a las burbujas de aire provenientes del proceso de flotación (Chau, Bruckard, Koh, & Nguyen, 2012).

Pirometalurgia: Es una rama de la metalurgia extractiva en la que se emplean procesos para obtención y refinado o refinación de metales utilizando calor, como en el caso de la fundición. Es la técnica más antigua para extracción de metales. Permite obtener metales a partir de sus menas, directamente o después de concentradas, por medio de calor. Se trata principalmente de extraer –del mineral– el metal, mediante separación –de la ganga– del mineral y purificación de los metales. El rango de temperaturas suele superar los 950 °C (Allibert, 2014).

Hidrometalurgia: Es la rama de la metalurgia que cubre la extracción y recuperación de metales usando soluciones líquidas, acuosas y orgánicas. Se basa en la concentración de soluciones en uno a varios elementos de interés metales, presentes como iones, que por reacciones reversibles y diferencias físicas de las soluciones son separados y aislados de forma específica. Como resultado se obtiene una solución rica en el ion de interés y con características propicias para la próxima etapa productiva (Domic, 2012).

Colector: Son compuestos químicos orgánicos que actúan selectivamente en la superficie de ciertos minerales.

Espumante: es un surfactante que se adiciona a la pulpa con el objetivo de estabilizar la espuma, en la cual se encuentra el mineral de interés. Por otra parte, los reactivos modificadores se usan para intensificar o reducir la acción de los colectores sobre la superficie mineral.

Tensión interfacial: es la energía de Gibbs por unidad de área de interfaz a temperatura y presión fijas. La tensión interfacial se produce porque una molécula cerca de una interfaz tiene interacciones moleculares diferentes de una molécula equivalente dentro del fluido estándar. Las moléculas surfactantes se sitúan preferentemente en la interfaz y por lo tanto disminuyen la tensión interfacial.

Reactivos químicos de flotación: son los compuestos usados en cada una de las etapas del proceso de flotación, teniendo dentro de ellos a los colectores, espumantes, activadores, depresores y modificadores de pH.

Componentes del equipo de flotación: diseño de la celda, sistema de agitación, forma en que se dispersa el flujo de aire, configuración de los bancos de celdas, control de los bancos de celdas.

Componentes de la operación: flujo de alimentación, mineralogía de la mena, granulometría de la mena, densidad de la pulpa, temperatura

Granulometría de la mena: es el tamaño de la partícula a ser sometida a proceso de investigación y/o análisis.

Densidad de pulpa: es la cantidad de sólidos en la flotación de minerales, la cual viene determinada desde la etapa de molienda/ clasificación.

Potencial de hidrógeno: también denominado pH, es el grado de acidez o basicidad que manifiesta el mineral disuelto en solución acuosa (Porras, 2012).

24. Hipótesis

A medida que aumenta la densidad de pulpa y aumenta el pH, el grado de hidrofobicidad aumentará y se incrementará el porcentaje de recuperación de cobre de un mineral tipo sulfuro de Calquis, Cajamarca.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1. Operacionalización de variables

- Variable independiente:

A: Densidad de pulpa (% solidos): 25%, 30% y 35%

B: pH (unidades): 9.0, 10.5, 12.0

- Variable dependiente:

Hidrofobicidad de cobre.

TABLA N° 04. Definición operacional de las variables

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACION AL	DIMEN- SIONES	INDICADORES
VI: Densidad de pulpa	<p>“También llamado porcentaje de sólidos, es la cantidad de sólidos en la flotación de minerales, la cual viene determinada desde la etapa de molienda/ clasificación.” (Bravo, 2012)</p>	<p>Cantidad de sólidos en la mezcla agua-mineral.</p>	<p>Parámetros físico</p>	<p>Análisis físico del mineral (% sólidos)</p>
VI: pH	<p>“Medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidrógeno [H]⁺ presentes en determinadas disoluciones” (Astucuri, 2014)</p>	<p>El pH es la variable de control más utilizada en la flotación, ya que resulta fundamental en la recuperación y selectividad, así como, en</p>	<p>Parámetros físico</p>	<p>Análisis físico de la pulpa (medición en el rango de 0 – 14)</p>

		la depresión de minerales.		
VD: Hidrofobicidad del cobre	“Representa la tendencia del agua a excluir moléculas no polares. El efecto se origina a partir de la ruptura de los enlaces de hidrógeno altamente dinámicas entre moléculas de agua líquida.” (Bravo, 2012)	Cantidad en porcentaje de cobre (ley de cobre) que se aleja del agua	Cantidad de cobre	Porcentaje de recuperación de cobre (ley de cobre)

Fuente: Elaboración propia

3.2. Diseño de investigación.

3.2.1. Según el propósito: Aplicada

Fue aplicada ya que se utilizaron los conocimientos en la práctica, para aplicarlos en provecho de la sociedad. Se tuvo como propósito dar solución a una situación o problema concreto e identificable como es la optimización del proceso de hidrofobicidad de cobre.

3.2.2. Según el diseño de investigación: Experimental

Fue experimental, debido a que es una situación de control en la cual se manipula de manera intencional las dos variables independientes de trabajo (densidad de pulpa y pH) para analizar las consecuencias sobre la variable dependiente (hidrofobicidad de cobre).

3.2.3. Según el tipo de investigación experimental: Experimental pura

Fue experimental pura ya que reunió dos requisitos:

- Control: Se formaron grupos de comparación (en uno de ellos se manipuló la variable).
- Validez interna: Los grupos se formaron aleatoriamente.

En este diseño se llegó a evaluar dos variables independientes y una dependiente. Así mismo se utilizaron pre pruebas y post pruebas para analizar la evolución de los grupos antes y después del tratamiento experimental de hidrofobicidad de cobre.

TABLA N° 05. Esquema del proceso experimental - puro

Grupo	Asignación	Pre Prueba	Tratamiento con Citrus cinensis	Post Prueba
Grupo estudio	R	Pre test 1	X	Post test 2
Grupo control	R	Pre test 3	-	Post test 4

Fuente: Elaboración propia

3.3. Unidad de estudio

Mineral sulfurado.

3.4. Población

Mineral sulfurado proveniente del distrito de Calquis, provincia de San Miguel de Pallaques, departamento de Cajamarca.

3.5. Muestra

La muestra estuvo constituida por 50 kg de mineral sulfurado proveniente del distrito de Calquis, provincia de San Miguel de Pallaques, departamento de Cajamarca.

se aplicó la siguiente fórmula: $n = \frac{Z^2 p(1-p)}{e^2}$

Z= 1.96

p=0.5

e=0.15

$$\frac{1.96^2 * 0.5(1-0.5)}{0.15^2} = 42.7 \Rightarrow \text{se redondeó a 50 kg.}$$

TABLA N° 06. Ley de cobre del mineral de estudio.

Propiedad	Valor
Ley de cobre	7.9 % (0.079 g/TM)

Fuente: Laboratorio de análisis químicos de la Universidad Nacional de Trujillo

3.6. Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos

3.6.1. Técnicas de recolección de datos

Se empleó la técnica de espectrofotometría, la cual es un método de análisis químico cuantitativo en el laboratorio que se utiliza para determinar la concentración desconocida de cobre presente en la solución.

3.6.2. Instrumentos y materiales

A. Instrumentos y equipos:

A.1. Espectrofotómetro de Absorción Atómica Shimadzu 8800.

Equipo que se basa en la Ley de Beer para cuantificar la concentración de la muestra, la cual nos dice que la concentración es proporcional a la absorbancia ($C=kA$). En Absorción Atómica la función de la llama es atomizar la muestra que luego es absorbida por una lámpara de cátodo hueco, específico para cada elemento.

Uso: Determinación de metales pesados a nivel de pequeñas concentraciones (ppm, ppb) en fluidos, aire, y alimentos.

Aplicación: Determinación de metales pesados en residuos y/o relaves mineros, alimentos, aguas contaminadas, aire contaminado, etc.

A.2. Celda de flotación DENVER

En la celda de flotación DENVER, se genera la presión negativa por la fuerza centrífuga durante la velocidad del impulsor. Al mismo tiempo la pulpa arriba de la placa se aspira por los hoyos de circulación a la cámara del impulsor formando la circulación superior. Su parte inferior de la pulpa se añade a la central,

formando de esta manera una pasta de la siguiente ciclo. La pulpa se lanza por la paleta inferior y se añade al centro formando un círculo inferior. El aire se aspira por el tubo de succión y el tanque central mezclando con la pulpa y formando burbujas finas pasando por la placa y extendido uniformemente en el tanque con forma de burbujas mineralizadas. Después de subir a la capa de burbuja se raspan para tener el producto de burbujas.

Tipo:	Tanque cilíndrico
Tamaño:	300 mm diámetro y 400 mm de altura
Revoluciones:	950 rpm
Material:	Acero de medio carbono
Motor:	1.50 Kw 4P motor enjaulado
Accesorios:	Faja en V con cobertura de seguridad Tubería de 1/4" para aire a baja presión Sistema para ducha de agua Válvula de desagüe Canaleta de recepción de concentrados Patas de soporte
Tiempo de flotación:	22.5 minutos para alimentación de 30 kph 13.5 minutos para alimentación de 50 kph.

A.6. pH metro Hanna modelo HI 8424.

Equipo cuyo principio es la medición de milivoltajes, el cual mediante una conversión se determina la diferencia de potencial Ion hidronio.

Uso: Determinación de pH de una muestra para análisis utilizando un electrodo adecuado.

Aplicación: Determinación de PH en soluciones acuosas, alimentos, relaves mineros, bebidas, etc.

A.5. Equipo de filtración.

Consta de un embudo cerámico con un soporte para filtro, trampa de succión y bomba de vacío.

Uso: Acelerar la separación de un sólido (solutos) y un solvente de una solución.

Aplicación: Separación de solutos que no reaccionan con el solvente, separación de carbón activado, tierra de diatomeas y otros tipos de adsorbentes.

A.6. Balanza analítica.

Equipo cuyo principio es una bobina centrada en el que su movimiento genera una carga eléctrica que es procesada, derivada y transformada a una unidad de peso.

Uso: Medir el peso de materiales.

Aplicación: Medir pesos, pesar solutos, calibrar materiales de vidrio volumétrico.

B. Materiales y reactivos

- Fiolas de 100 ml, Clase A
- Vasos de precipitado de 100,400,1000 mL
- Matraces erlenmeyer de 100,250 mL
- Pipetas volumétricas (5mL,10mL, 15mL y 25 mL) Clase A
- Baguetas de vidrio
- Embudos de vidrio de vástago largo
- Espatula de acero inoxidable
- Piscetas
- Buretas
- Papel filtro Whatman N 40
- Cinta de pH.
- Soporte de madera para embudos
- Reactivo A-238
- Reactivo A-404
- Reactivo A-31
- Reactivo Z-11

3.6.3. Procedimiento de recolección de datos

El presente estudio se desarrolló siguiendo el siguiente procedimiento experimental:

1°. La muestra de 50 kg de mineral (Calcopirita), fué homogenizada y cuarteada, sacando una muestra de 1kg de mineral, la cual se chancó y pulverizó a malla - #100, obteniendo una muestra de 20g de mineral que fue secada y posteriormente enviada al laboratorio para su análisis químico por cobre.

2°. El mineral restante se trituró y se tamizó por la malla #10, luego a 1 Kg de este mineral se hace la molienda respectiva por 20 minutos, hasta obtener 55% - #200.

3°. Se pesó 1.0 Kg de mineral 100% - #10, se colocó dentro del molino de bolas de laboratorio, seguido se agregó 0.82 litros de agua, para obtener una pulpa con 55% de sólidos en el molino. Se agregó 1.6 g cal (1.6g Kg/TM para obtener pH igual a 9.0), 1 gota de A-31(16g/TM), y moler por 20 minutos.

Para estos datos se procedió de la siguiente manera:

A. CALCULO DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL MINERAL (G.E.):

Peso de la fiola de 1L = X1= 61.258 g

Peso de la fiola + agua = X2 = 161.962 g

Peso del agua = X3 = X2 – X1 = 100.704 g

Peso del mineral (o muestra) = X4 = 43.100 g

Peso de la fiola + mineral = X5 = 104.358 g

Peso de la fiola + mineral + agua = X6 = 194.978 g

Volumen o peso del agua = X7 = X6 – X5 = 90.620 g o cm³

Volumen del mineral = X8 = X3 – X7 = 10.084 cm³

Peso específico del mineral = X4/X8 = 43.100/10.084 = 4.27

B. CALCULO DE LA DENSIDAD DE PULPA DEL MOLINO: (ver paso 3°)

Peso específico del mineral = 4.27

Peso del mineral (o muestra) = 1000 g

Volumen o Peso de agua = 820 cm³ o g

$$D_p = (1000 + 820) / [(1000/4.27)+820] = 1.727$$

C. CALCULO DEL PORCENTAJE DE SOLIDOS EN EL MOLINO: (ver paso 3°)

Peso específico del mineral = 4.27

$$D_p = (1000 + 820) / [(1000/4.27)+820] = 1.727$$

$$\% \text{ Sol} = [4.27 * (1.727-1)]/[1.727 * (4.27-1)] * 100 = 55 \%$$

4°. Se retiró la pulpa del molino con cuidado y se lavó agregando agua sin pasar al 25% de sólidos, luego se llevó hacia el vaso de la celda de flotación.

5°. Se agregó agua, la necesario para llegar al 25% de sólidos, durante el acondicionamiento por 4 minutos de la pulpa agregando los reactivos: 3 gotas de A- 238 (48g/TM), 2 gotas de A-404 (32 g/TM), 1 gota de D-250 (16 g/TM) y 3 ml de Z-11 (1%).

6°. Flotación, después de acondicionar con los reactivos se abrió ligeramente la válvula de aire y flotar durante 3 minutos, retirando las espumas, luego se procedió a secar el concentrado (espumas), se pesó y analizó por Cu. De la misma forma se procedió con el relave de la flotación. Para estos datos se procedió de la siguiente manera:

D. CALCULO DEL PORCENTAJE DE SOLIDOS AL 25% DE SÓLIDOS

Peso específico del mineral = 4.27

Peso del mineral (o muestra) = 1000 g

Volumen o Peso de agua = 820 cm³ o g

Volumen o Peso de agua ADICIONAL = 2180 cm³ o g => Volumen o Peso de agua TOTAL = 3000 cm³ o g

$$D_p = (1000 + 3000) / [(1000/4.27)+3000] = 1.237$$

$$\% \text{ Sol} = [4.27 * (1.237-1)]/[1.237 * (4.27-1)] * 100 = 25 \%$$

7°. Se repitió los paso 4, 5 y 6 y 7, variando la densidad de pulpa (% de sólidos) y dosificación de cal, para obtener 30% de sólidos y 35% de sólidos, pH 10.5 y pH 12.0 respectivamente, procediendo según la tabla para completar los 27 experimentos

E. CALCULO DEL PORCENTAJE DE SOLIDOS AL 30% DE SÓLIDOS

Peso específico del mineral = 4.27

Peso del mineral (o muestra) = 1000 g

Volumen o Peso de agua = 820 cm³ o g

Volumen o Peso de agua ADICIONAL = 1330 cm³ o g => Volumen o Peso de agua TOTAL = 2330 cm³ o g

$$D_p = (1000 + 2330) / [(1000/4.27)+2300] = 1.299$$

$$\% \text{ Sol} = [4.27 * (1.299-1)]/[1.299 * (4.27-1)] * 100 = 30 \%$$

F. CALCULO DEL PORCENTAJE DE SOLIDOS AL 35% DE SÓLIDOS

Peso específico del mineral = 4.27

Peso del mineral (o muestra) = 1000 g

Volumen o Peso de agua = 820 cm³ o g

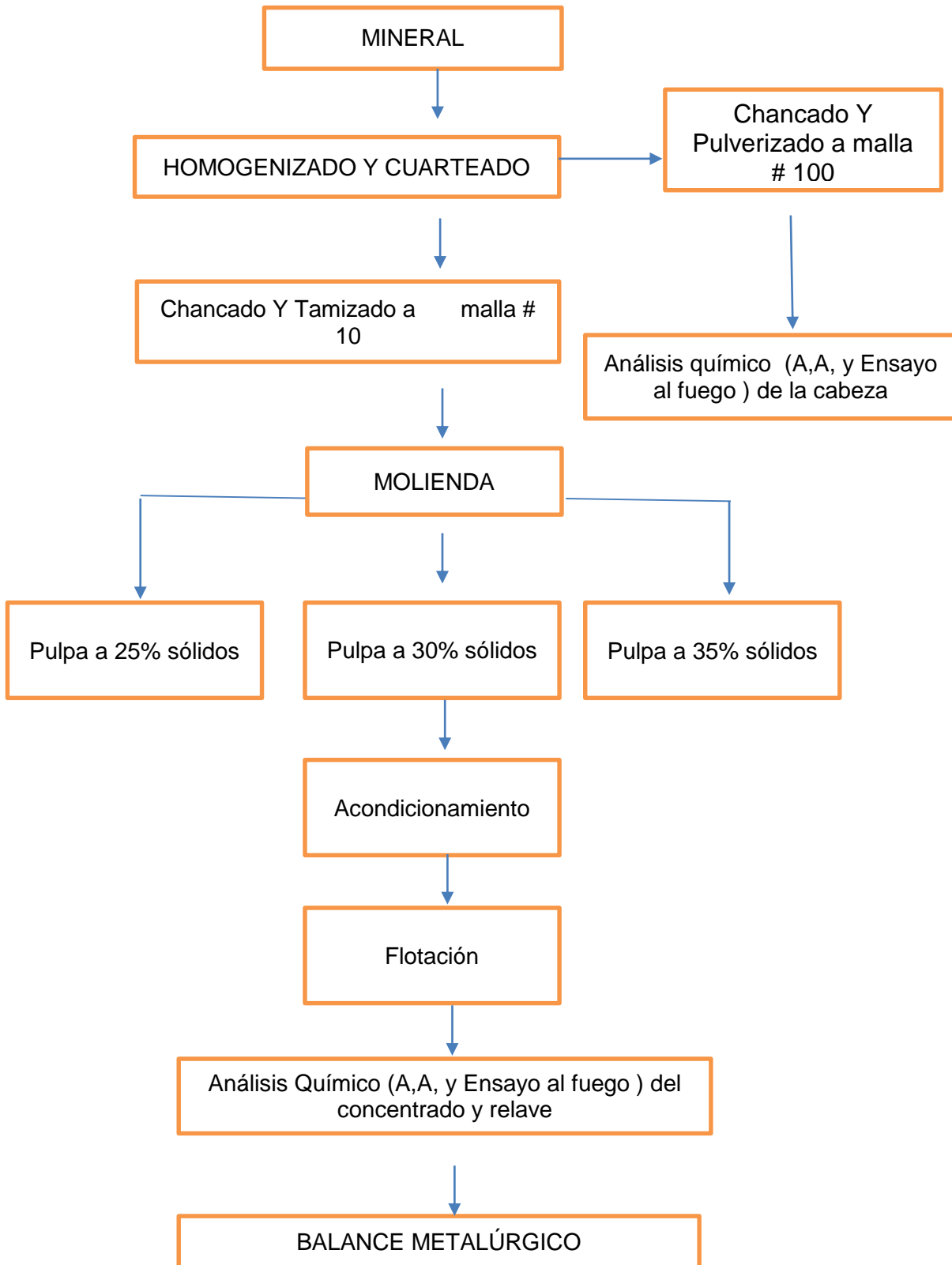
Volumen o Peso de agua ADICIONAL = 860 cm³ o g => Volumen o Peso de agua TOTAL = 1860 cm³ o g

$$D_p = (1000 + 1860) / [(1000/4.27)+1860] = 1.366$$

$$\% \text{ Sol} = [4.27 * (1.366-1)]/[1.366 * (4.27-1)] * 100 = 35 \%$$

Terminado las pruebas y obtenido los datos de pesos de concentrados y leyes de Cu, se procedió a realizar los balances metalúrgicos, donde se obtiene el ratio de concentración y las recuperaciones para el Cu, así como la interpretación de los resultados.

FIGURA N° 10: Procedimiento experimental de flotación de mineral.



Fuente: Elaboración propia

3.7. Métodos, instrumentos y procedimientos de análisis de datos

Los instrumentos que se utilizaron fueron tablas de Excel, gráficos y Cálculos de análisis de varianza los cuales sirvieron para recopilar y analizar la información, de los resultados de la recuperación de cobre con los diferentes parámetros de densidad de pulpa y pH.

CAPÍTULO 4. DESARROLLO

4.1. Protocolo de flotación.

1. Primer Etapa.

En esta primera etapa se ha considerado realizar 03 flotaciones, evaluando la recuperación de los valores metálicos del cobre.

Prueba de Flotación N° 1

Esta prueba de flotación se realizó a una densidad de 25 % sólidos

MOLIENDA

Peso del mineral	:	1.0 kg
Densidad	:	25 % de sólidos
Tiempo de molienda	:	20 minutos
Granulometría	:	55% - 200 mallas
Cal Hidratada	:	Apropiada para llevar al pH deseado
pH	:	9.0, 10.5, 12.0

FLOTACION

Acondicionamiento	:	4´
A-238	:	48 gr/TM
A-404	:	32 gr/TM
A-31	:	16 gr/TM
Z-11	:	1 %
pH	:	8.5
Flotación	:	3´

Prueba de Flotación N° 2

Esta prueba de flotación se realizó a una densidad de 30 % sólidos

MOLIENDA

Peso del mineral	:	1.0 kg
Densidad	:	30 % de sólidos
Tiempo de molienda	:	20 minutos
Granulometría	:	60% - 200 mallas
Cal Hidratada	:	Apropiada para llevar al pH deseado
pH	:	9.0, 10.5, 12.0

FLOTACION

Acondicionamiento	:	4´
A-238	:	48 gr/TM
A-404	:	32 gr/TM
A-31	:	16 gr/TM
Z-11	:	1 %
pH	:	8.5
Flotación	:	3´

Prueba de Flotación N° 3

Esta prueba de flotación se realizó a una densidad de 35 % sólidos

MOLIENDA

Peso del mineral	:	1.0 kg
Densidad	:	35 % de sólidos
Tiempo de molienda	:	20 minutos
Granulometría	:	65% - 200 mallas
Cal Hidratada	:	Apropiada para llevar al pH deseado
pH	:	9.0, 10.5, 12.0

FLOTACION

Acondicionamiento	:	4´
A-238	:	48 gr/TM
A-404	:	32 gr/TM
A-31	:	16 gr/TM
Z-11	:	1 %
pH	:	8.5
Flotación	:	3´

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

Los resultados de las diferentes pruebas experimentales para hallar la hidrofobicidad del cobre en función del porcentaje de recuperación, variando la densidad de pulpa y pH, se muestra a continuación.

TABLA N° 07. Ley de cobre en el relave después de realizar los ensayos (Ley_i = 7.9 % Cu)

Diseño		A: Densidad de pulpa (% sólidos)		
		25%	30%	35%
B: pH	9.0	2.50	1.79	2.21
	10.5	2.24	1.04	1.33
	12.0	2.43	1.56	1.95

Fuente: Elaboración Propia

TABLA N° 08. Porcentaje de recuperación de cobre después de realizar los ensayos (Ley_i = 7.9%Cu)

Diseño		A: Densidad de pulpa (% sólidos)		
		25%	30%	35%
B: pH	9.0	68.33%	77.40%	72.05%
	10.5	71.60%	86.80%	83.20%
	12.0	69.18%	80.30%	75.30%

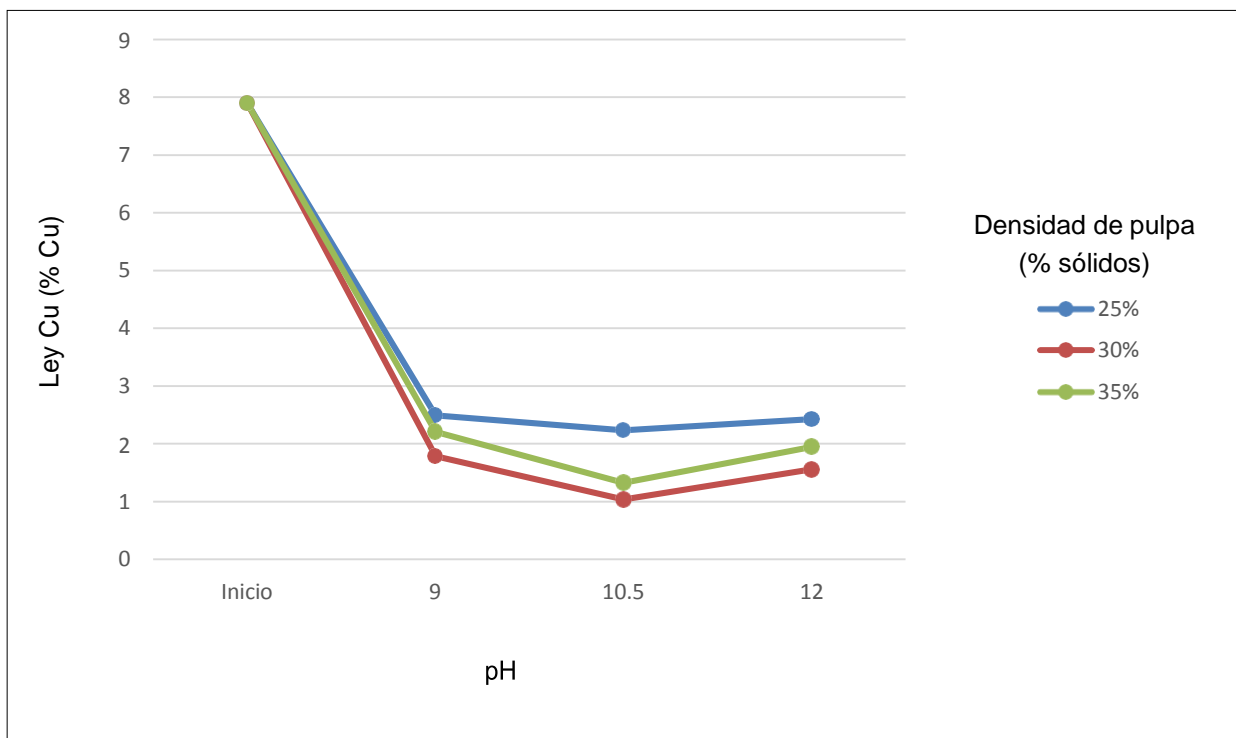
Fuente: Elaboración Propia

En el resultado se puede apreciar que a pH = 9.0 y densidad de pulpa de 25 % sólidos se recuperó un promedio de 68.33 % y la mayor recuperación se obtuvo a pH= 10.5 y densidad de pulpa de 30 % sólidos, obteniéndose un 86.80%.

CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN

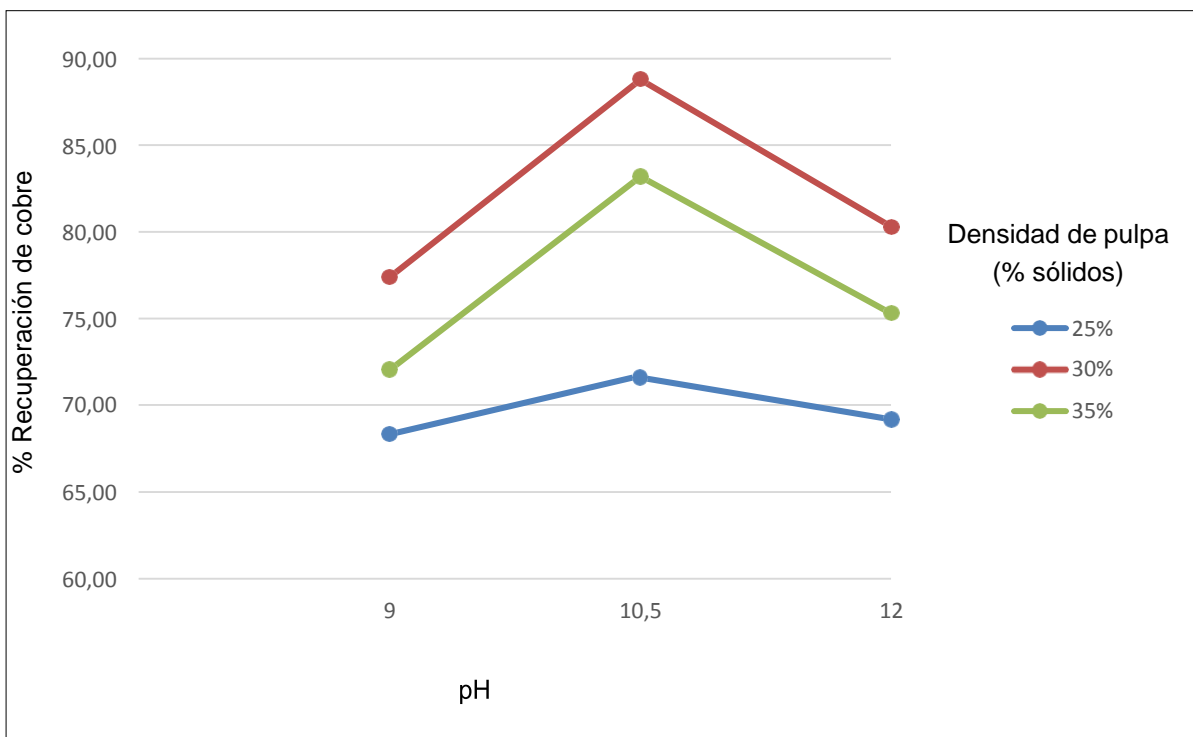
De los resultados obtenidos experimentalmente se observa que existen variables que son posibles de manipular de tal manera que se obtiene altos niveles de hidrofobicidad de cobre en función de la recuperación y está directamente relacionado con el pH y la densidad de pulpa.

FIGURA N° 11. Resultados de la Ley de cobre del relave después de realizar los ensayos (Leyi = 7.9 % Cu) con la influencia del pH y la densidad de pulpa



Fuente: Elaboración Propia

FIGURA N° 12: Resultados del porcentaje de recuperación de cobre después de realizar los ensayos ($Ley_i = 7.9\% \text{ Cu}$) con la influencia del pH y la densidad de pulpa.



Fuente: Elaboración propia

En este estudio podemos observar la hidrofobicidad del cobre en función de la recuperación que está directamente relacionada con el pH y la densidad de pulpa

A mayor pH y densidad de pulpa mayor será la hidrofobicidad en función de la recuperación de cobre.

CONCLUSIONES

Se concluye que existe influencia significativa de la densidad de pulpa y el pH sobre el porcentaje de hidrofobicidad de cobre en función de su recuperación por flotación de un mineral tipo sulfuro, Calquis, Cajamarca.

Se determinó la densidad de pulpa óptima en la flotación de un mineral tipo sulfuro el cual fue de 30 % de sólidos.

Con respecto al pH, el parámetro más adecuado se obtuvo a 10.5, obteniéndose un valor de recuperación de 86.80 %

Finalmente se concluye que mediante el análisis de varianza a un nivel de significancia de 95%, el pH y la densidad de pulpa influyen significativamente en la recuperación de cobre y sobre la hidrofobicidad, tanto de manera individual como en su interacción.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar una investigación abordando otras variables como uso de otros colectores, así como de espumantes y depresores.

Trabajar con otros parámetros de ejecución para identificar puntos de quiebre que nos permita determinar optimización de procesos desde diferentes factores técnico económico.

Realizar un análisis minerográfico para determinar donde se encuentra el cobre, que posiblemente este encapsulado en el mineral sulfurado

Realizar otros tipos de análisis espectrofotométricos o químicos para determinar qué otros elementos metálicos contiene y predecir de mejor manera el posible comportamiento fisicoquímico de la prueba.

REFERENCIAS

- Allibert, M. (2014). *Pyrometallurgy Fundamentals*. Concepción: Universidad de Concepción.
- Astucuri, V. (2014). *Introducción a la flotación de minerales*. Lima: Universidad de Lima.
- Ballester, A. (2012). *Metalurgia Extractiva. Volumen I*. Madrid: Editorial Síntesis.
- Barona, F. (2016). *Influencia de la distribución de tamaño de burbujas en la recuperación de la flotación para minerales de cobre*. Santiago de Chile: Univeridad de Chile (Tesis para optar el grado de magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en Metalúrgica Extractiva).
- Bartlett, R. (2012). *Solution Mining, Leaching and Fluid Recovery of Materials*. New York: Gordon and Breach.
- Biswas, A., & Davenport, W. (2012). *Extractive Metallurgy of Copper*. New York: Elsevier Science Press.
- Bray, J. (2015). *Metalurgia Extractiva de Metales no ferrosos*. MAdrid: Mc Graw – Hill.
- Cáceres, G. (2012). *Hidrometalurgia y Electrometalurgia*, .
- Chau, T., Bruckard, P., Koh, L., & Nguyen, V. (2012). *A review of factors that affect contact angle and implications for flotation practice*. New York: Advances in colloid and interface science.
- Chía, J. (2012). *Influencia de molienda y clasificación en la flotación de minerales sulfurados*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Concentración de minerales. (2013). *Flotación de minerales*. Lima: Tecsup.
- Cuadros, J. (2012). *Fuerzas intermoleculares. Fuerzas de Van der Waals*. México.
- Dixon, D., Baxter, K., & Sylwestrzak, L. (2014). *Galvanox™ Treatment of Copper Concentrates*. Australia: Proceedings.
- Domic, E. (2012). *Hidrometalurgia: Fundamentos, procesos y aplicaciones*. Santiago de Chile: Adventures Works.
- Garrels, R., & Christ, C. (2015). *Solutions, Minerals and Equilibria*. California: Freeman Cooper & Co.

- Grez, P. (2013). *Estudio Electroquímico de la interacción de superficies de cobre y enargita con colectores del tipo Tio: Etilxantato y Dibutilditiocarbamato*. Valparaíso: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (Tesis: Doctor en Ciencias - Mención en Química).
- Guzmán, M. (2013). *Hidrometalurgia del Cobre*.
- Herreros, O., & Medina, J. (2012). *Proceso de lixiviación de crisocola – Estudio cinético en reactor agitado*. Cusco: IV Latinometalurgia.
- Infomine. (03 de marzo de 2017). *investmentmine*. Obtenido de <http://www.infomine.com/investment/metal-prices/copper/5-year/>
- Pavez, O. (2016). *Apuntes de concentración de minerales*. Atacama: Universidad de Atacama.
- Pérez, N. (2014). *Electrochemistry and Corrosion Science*. New York: Kluwer Academic Publishers.
- Porras, D. (2012). *Concentración de minerales*. Lima: Tecsup.
- Posadas, D. (2014). *Introducción a la Electroquímica*.
- Reyes, I. (2015). *Procesamiento de Minerales II*. Trujillo: Universidad nacional de trujillo.
- Rubio, J. (2013). *Nuevas tecnologías para el tratamiento de partículas minerales finas y ultrafinas*. Atacama: Universidad de Atacama.
- Sutulov, A. (2013). *Flotación de minerales*. Santiago de Chile: Edit.
- Tantalean, G. (2013). *Introducción a la Metalurgia*.
- Terkel, R. (2012). *Fundamentos de Metalurgia Extractiva*. México: Limusa.
- Tobón, M. (2013). *Estudio de la hidrofobicidad de oro nativo y su efecto en la flotación espumante directa*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia (Tesis para Doctorado en Ingeniería, ciencia y Tecnología de Materiales).
- Zbigniew, S. (2014). *Metalurgia No Ferrosa*. México: Limusa.

LINKOGRAFÍA

Azañero, O. (15 de agosto de 2016). *Producción de sulfato de cobre pentahidratado a partir de cemento de cobre. Perú: TECSUP.* Obtenido de http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/geologia/vol8_n15/a02.pdf

Bravo, A. (2012). *Manual de flotación de minerales.* Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos-pdf5/manual-flotacion-minerales/manual-flotacion-minerales2.shtml>

Heredia, A. (18 de Noviembre de 2016). *Experimentos de Química Recreativa con Sulfato de Cobre pentahidratado.* Obtenido de <http://www.escriitoscientificos.es/trab1a20/sulfato.htm>

Infomine. (03 de marzo de 2017). *investmentmine.* Obtenido de <http://www.infomine.com/investment/metal-prices/copper/5-year/>

Luna, H. (15 de noviembre de 2016). *Balance y análisis de la minería en el Perú 2014-2015.* Obtenido de http://www.tecnologiaminera.com/tm/biblioteca/pdfart/150714045343_BALANCE.pdf

Sánchez, Z. (23 de octubre de 2016). *Tecnología de la producción de sales de cobre. Perú: TECSUP.* Obtenido de <http://app.tecsup.edu.pe/file/sga/documentos/revistali/li3/7.pdf>

APÉNDICE

Apéndice I: Resultados de las pruebas de hidrofobicidad de cobre en función de su recuperación.

TABLA I. Resultados de la ley de relave de cobre después de realizar los ensayos
(Ley_i = 7.90%)

		Densidad de pulpa (% de sólidos)					
		25%		30%		35%	
pH	9.0	2.52		1.65		2.28	
		2.46	2.50	1.83	1.79	2.19	2.21
		2.53		1.88		2.15	
	10.5	2.18		1.01		1.28	
		2.25	2.24	1.12	1.04	1.35	1.33
		2.30		1.00		1.35	
	12.0	2.56		1.55		1.99	
		2.40	2.43	1.62	1.56	1.95	1.95
		2.34		1.50		1.91	

Fuente: Elaboración propia

Se aplicó la siguiente fórmula, a los datos de las leyes encontradas en las muestras de la solución de estudio, después del proceso de flotación, a fin de obtener valores de los porcentajes de eficiencia de recuperación.

$$\eta = \frac{Li - If}{Li} \cdot 100$$

Donde:

η = porcentaje de recuperación de cobre (%).

Li = Ley inicial de cobre.

If = Ley final de cobre.

Ejemplo de cálculo:

$$l_i = 7.90 \%$$

$$l_f = 2.52 \%$$

$$\eta = \frac{7.90 - 2.52}{7.90} \times 100$$

$$\eta = 68.10 \%$$

De la misma manera se procedió al cálculo de todos los porcentajes de recuperación de cobre a partir de los datos promedio de las leyes finales tal como se muestra a continuación

TABLA II. Tabla resumen del Porcentaje (%) de recuperación de cobre por la influencia de la densidad de pulpa y pH.

		Densidad de pulpa (% de sólidos)					
		25%		30%		35%	
pH	9.0	68.10		79.11		71.14	
		68.86	68.33	76.84	77.40	72.28	72.05
		68.03		76.25		72.73	
pH	10.5	72.41		87.22		83.80	
		71.52	71.60	85.82	86.80	82.91	83.20
		70.88		87.36		82.89	
pH	12.0	67.59		80.38		74.81	
		69.62	69.18	79.49	80.30	75.32	75.30
		70.32		81.03		75.77	

Fuente: Elaboración propia

Tabla III. Balance metalúrgico por hidrofobicidad a pH 9.0 y densidades de pulpa al 25 % de sólidos

Prueba N° 01 (R1) (pH: 9.0 - 25% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.245	10.286	0.0252	68.10	68.50
Conc. Cu	0.755	7.258	0.0548		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Prueba N° 01 (R2) (pH: 9.0 - 25% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.245	10.041	0.0246	68.86	69.25
Conc. Cu	0.755	7.338	0.0554		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Prueba N° 01 (R3) (pH: 9.0 - 25% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.245	10.309	0.0253	68.03	68.43
Conc. Cu	0.755	7.251	0.0547		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Fuente: Elaboración propia

Tabla IV. Balance metalúrgico por hidrofobicidad a pH 9.0 y densidades de pulpa al 30 % de sólidos

Prueba N° 02 (R1) (pH: 9.0 - 30% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.247	6.680	0.0165	79.11	79.38
Conc. Cu	0.753	8.433	0.0635		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Prueba N° 02 (R2) (pH: 9.0 - 30% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.225	8.133	0.0183	76.84	77.13
Conc. Cu	0.775	7.961	0.0617		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Prueba N° 02 (R3) (pH: 9.0 - 30% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.251	7.475	0.0188	76.25	76.55
Conc. Cu	0.749	8.176	0.0612		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Fuente: Elaboración propia

Tabla V. Balance metalúrgico por hidrofobicidad a pH 9.0 y densidades de pulpa al 35 % de sólidos

Prueba N° 03 (R1) (pH: 9.0 - 35% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.248	9.194	0.0228	71.14	71.50
Conc. Cu	0.752	7.606	0.0572		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Prueba N° 03 (R2) (pH: 9.0 - 35% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.239	9.163	0.0219	72.28	72.63
Conc. Cu	0.761	7.635	0.0581		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Prueba N° 03 (R3) (pH: 9.0 - 35% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.243	8.865	0.0215	72.73	73.07
Conc. Cu	0.757	7.722	0.0585		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Fuente: Elaboración propia

Tabla VI. Balance metalúrgico por hidrofobicidad a pH 10.5 y densidades de pulpa al 25 % de sólidos

Prueba N° 04 (R1) (pH: 10.5 - 25% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.239	9.121	0.0218	72.41	72.75
Conc. Cu	0.761	7.648	0.0582		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Prueba N° 04 (R2) (pH: 10.5 - 25% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.229	9.825	0.0225	71.52	71.88
Conc. Cu	0.771	7.458	0.0575		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Prueba N° 04 (R3) (pH: 10.5 - 25% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.228	10.091	0.0230	70.88	71.24
Conc. Cu	0.772	7.382	0.0570		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Fuente: Elaboración propia

Tabla VII. Balance metalúrgico por hidrofobicidad a pH 10.5 y densidades de pulpa al 30 % de sólidos

Prueba N° 05 (R1) (pH: 10.5 - 30% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.237	4.262	0.0101	87.22	87.38
Conc. Cu	0.763	9.161	0.0699		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Prueba N° 05 (R2) (pH: 10.5 - 30% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.248	4.516	0.0112	85.82	86.00
Conc. Cu	0.752	9.149	0.0688		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Prueba N° 05 (R3) (pH: 10.5 - 30% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.245	4.075	0.0100	87.36	87.52
Conc. Cu	0.755	9.274	0.0700		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Fuente: Elaboración propia

Tabla VIII. Balance metalúrgico por hidrofobicidad a pH 10.5 y densidades de pulpa al 35 % de sólidos

Prueba N° 06 (R1) (pH: 10.5 - 35% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.239	5.356	0.0128	83.80	84.00
Conc. Cu	0.761	8.830	0.0672		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Prueba N° 06 (R2) (pH: 10.5 - 35% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.242	5.579	0.0135	82.91	83.13
Conc. Cu	0.758	8.773	0.0665		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Prueba N° 06 (R3) (pH: 10.5 - 35% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.238	5.679	0.0135	82.89	83.11
Conc. Cu	0.762	8.725	0.0665		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Fuente: Elaboración propia

Tabla IX. Balance metalúrgico por hidrofobocidad a pH 12.0 y densidades de pulpa al 25 % de sólidos

Prueba N° 07 (R1) (pH: 12.0 - 25% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.245	10.449	0.0256	67.59	68.00
Conc. Cu	0.755	7.205	0.0544		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Prueba N° 07 (R2) (pH: 12.0 - 25% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.239	10.042	0.0240	69.62	70.00
Conc. Cu	0.761	7.359	0.0560		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Prueba N° 07 (R3) (pH: 12.0 - 25% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.238	9.850	0.0234	70.32	70.70
Conc. Cu	0.762	7.422	0.0566		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Fuente: Elaboración propia

Tabla X. Balance metalúrgico por hidrofobicidad a pH 12.0 y densidades de pulpa al 30 % de sólidos

Prueba N° 08 (R1) (pH: 12.0 - 30% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.241	6.432	0.0155	80.38	80.63
Conc. Cu	0.759	8.498	0.0645		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Prueba N° 08 (R2) (pH: 12.0 - 30% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.238	6.807	0.0162	79.49	79.75
Conc. Cu	0.762	8.373	0.0638		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Prueba N° 08 (R3) (pH: 12.0 - 30% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.287	5.223	0.0150	81.03	81.26
Conc. Cu	0.713	9.118	0.0650		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Fuente: Elaboración propia

Tabla XI. Balance metalúrgico por hidrofobicidad a pH 12.0 y densidades de pulpa al 35 % de sólidos

Prueba N° 09 (R1) (pH: 12.0 - 35% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.248	8.024	0.0199	74.81	75.13
Conc. Cu	0.752	7.992	0.0601		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Prueba N° 09 (R2) (pH: 12.0 - 35% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.238	8.193	0.0195	75.32	75.63
Conc. Cu	0.762	7.940	0.0605		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Prueba N° 09 (R3) (pH: 12.0 - 35% sólidos)	Kg	Ley de Cu		% Recuperación de Cu	
		%	g/TM	Cabeza	Calculada
Cabeza	1.000	7.900	0.0790		
Relave	0.245	7.814	0.0191	75.77	76.07
Conc. Cu	0.755	8.060	0.0609		
Cabeza calculada	1.000	8.000	0.0800		

Fuente: Elaboración propia

Procesamiento estadístico de datos

1. Cálculos para el análisis de varianza (ANVA)

Permite determinar si las medias de cada nivel o tratamiento son estadísticamente diferentes. Para su determinación se procedió como se indica a continuación.

1.1. Datos previos

1.1.1. Planteamiento de hipótesis

Hipótesis Nula ($T H_0$): A medida que aumenta la densidad de pulpa, no afecta el incremento de la hidrofobicidad del cobre en función de su recuperación, de Calquis, Cajamarca.

Hipótesis Alterna ($T H_1$): A medida que aumenta la densidad de pulpa, afecta el incremento de la hidrofobicidad del cobre en función de su recuperación, de Calquis, Cajamarca.

Hipótesis Nula (βH_0): A medida que aumenta el pH, no afecta el incremento de la hidrofobicidad del cobre en función de su recuperación, de Calquis, Cajamarca.

Hipótesis Alterna (βH_1): A medida que aumenta el pH, afecta el incremento de la hidrofobicidad del cobre en función de su recuperación, de Calquis, Cajamarca.

Hipótesis Nula ($T\beta H_0$): A medida que aumenta la densidad de pulpa y el pH, no afecta el incremento de la hidrofobicidad del cobre en función de su recuperación, de Calquis, Cajamarca.

Hipótesis Alterna ($T\beta H_1$): A medida que aumenta la densidad de pulpa y el pH, afecta el incremento de la hidrofobicidad del cobre en función de su recuperación, de Calquis, Cajamarca.

1.1.2. Nivel de significancia

En ingeniería se trabaja con un 95 % de confianza ($\alpha=0.05$)

1.1.3. Criterio de rechazo

Se rechaza la hipótesis nula (H_0) si $F_0 > F_{\alpha, v_1, v_2}$, donde el F_0 se obtiene experimentalmente y el F_{α, v_1, v_2} se obtiene de tablas (Anexo 5).

1.2. Cálculos para el ANVA de la recuperación de cobre

1.2.1. Presentación de datos

En la Tabla XII se presentan los datos individuales de la hidrofobicidad del cobre en función de la recuperación de cobre en la medida de %, que permiten realizar el análisis de varianza respectivo.

Tabla XII. Hidrofobocidad de cobre en función de la recuperación a diferentes densidades de pulpa y pH

Factor	Densidad de pulpa (% de sólidos)									$\sum Y_i$	$Y_{i, prom}$
	25 %			30 %			35 %				
pH	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
9.0	2.52	2.46	2.53	1.65	1.83	1.88	2.28	2.19	2.15	19.49	2.17
10.5	2.18	2.25	2.30	1.01	1.12	1.00	1.28	1.35	1.35	13.84	1.54
12.0	2.56	2.40	2.34	1.55	1.62	1.50	1.99	1.95	1.91	17.83	1.98
$\sum Y_j$	21.54			13.15			16.46			51.15	
$\sum Y_{ij}$	7.51	6.73	7.30	5.36	3.13	4.67	6.62	3.98	5.85		

1.2.2. Cálculo del término de corrección

$$C = \frac{Y^2}{N}$$

$$\frac{Y^2}{N} = \frac{[(2.52)^2 + (2.46)^2 + (2.53)^2 \dots + (1.91)^2]}{3 * 3 * 3} = \frac{2616.7399}{27}$$

$$\frac{Y^2}{N} = 96.9163$$

1.2.3 Cálculo de la suma del total de cuadrados (SST)

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^r Y_{ijk}^2 - \frac{y^2}{N}$$

$$SST = [(2.52)^2 + (2.46)^2 + (2.53)^2 \dots + (1.91)^2] - 96.9163$$

$$SST = 6.2681$$

1.2.4. Cálculo de la suma de cuadrados debido a los tratamientos (SSA)

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_i^2}{br} - \frac{y^2}{N}$$

$$SSA = \frac{(19.49)^2 + (13.84)^2 + (17.83)^2}{3 * 3} - 96.9163$$

$$SSA = 1.8709$$

1.2.5. Cálculo de la suma de cuadrados debido a los tratamientos (SSB)

$$SS_B = \sum_{j=1}^a \frac{y_j^2}{ar} - \frac{y^2}{N}$$

$$SSB = \frac{(21.54)^2 + (13.15)^2 + (16.46)^2}{3 * 3} - 96.9163$$

$$SSB = 3.9666$$

1.2.6. Cálculo de (SSSub totales)

$$SS_B = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y^2 i}{r} - \frac{y^2}{N}$$

$$SS_{Sub\ totales} = \frac{(7.51)^2 + (6.73)^2 + (7.30)^2 \dots + (5.85)^2}{3} - 96.9163$$

$$SS_{Sub\ totales} = 6.1734$$

1.2.7. Cálculo de la suma de cuadrados debido al error (SSE)

$$SSE = SST - SS_{sub\ totales}$$

$$SS_E = 6.2681 - 6.1734$$

$$SS_E = 0.0947$$

1.2.8. Cálculo de la suma de cuadrados debido a los tratamientos (SSAB)

$$SS_{AB} = SS_T - SS_A - SS_B - SS$$

$$SS_{AB} = 6.2681 - 1.8709 - 3.9666 - 0.0947 = 0.3359$$

1.2.9. Cálculo de la media de la suma de cuadrados debido a los tratamientos (MSA)

$$MS_A = \frac{SS_A}{A - 1}$$

$$MS_A = \frac{1.8709}{3 - 1}$$

$$MS_A = 0.9354$$

1.2.10. Cálculo de la media de la suma de cuadrados debido a los tratamientos de (MSB)

$$MS_B = \frac{SS_B}{B - 1}$$

$$MS_B = \frac{3.9666}{3 - 1}$$

$$MS_B = 1.9836$$

1.2.11. Cálculo de la media de la suma de cuadrados debido a los tratamientos de (MSAB)

$$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{((A - 1)(B - 1))}$$

$$MS_{AB} = \frac{0.3359}{((3 - 1)(3 - 1))}$$

$$MS_{AB} = 0.0840$$

1.2.12. Cálculo de la media de la suma de cuadrados debido al error (MSE)

$$MS_E = \frac{SS_E}{(AB(r - 1))}$$

$$MS_E = \frac{0.0947}{((3 - 1))(3 - 1)}$$

$$MS_E = 0.0053$$

1.2.13. Cálculo de la función Fo

$$F_{0A} = \frac{MS_A}{MS_E}$$

$$F_{0A} = \frac{0.9354}{0.0053}$$

$$F_{0A} = 177.8079$$

$$F_{0B} = \frac{MS_B}{MS_E}$$

$$F_{0B} = \frac{1.9833}{0.0053}$$

$$F_{0B} = 376.9927$$

$$F_{0AB} = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$$

$$F_{0AB} = \frac{0.0840}{0.0053}$$

$$F_{0AB} = 15.9613$$

Tabla XIII. Cuadro resumen del análisis de varianza para la hidrofobicidad de cobre en función de su recuperación.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Media de Cuadrados	F _o	F _α , v1,v2
Tratamiento A (pH)	2.0	1.8709	0.9354	177.8079	3.5546
Tratamiento B (Densidad de pulpa)	2.0	3.9666	1.9833	376.9927	3.5546
Interacción AB	4.0	0.3359	0.0840	15.9613	2.9277
Error	18.0	0.0947	0.0053		
Total	26.0	6.2681			

1.3. Decisión

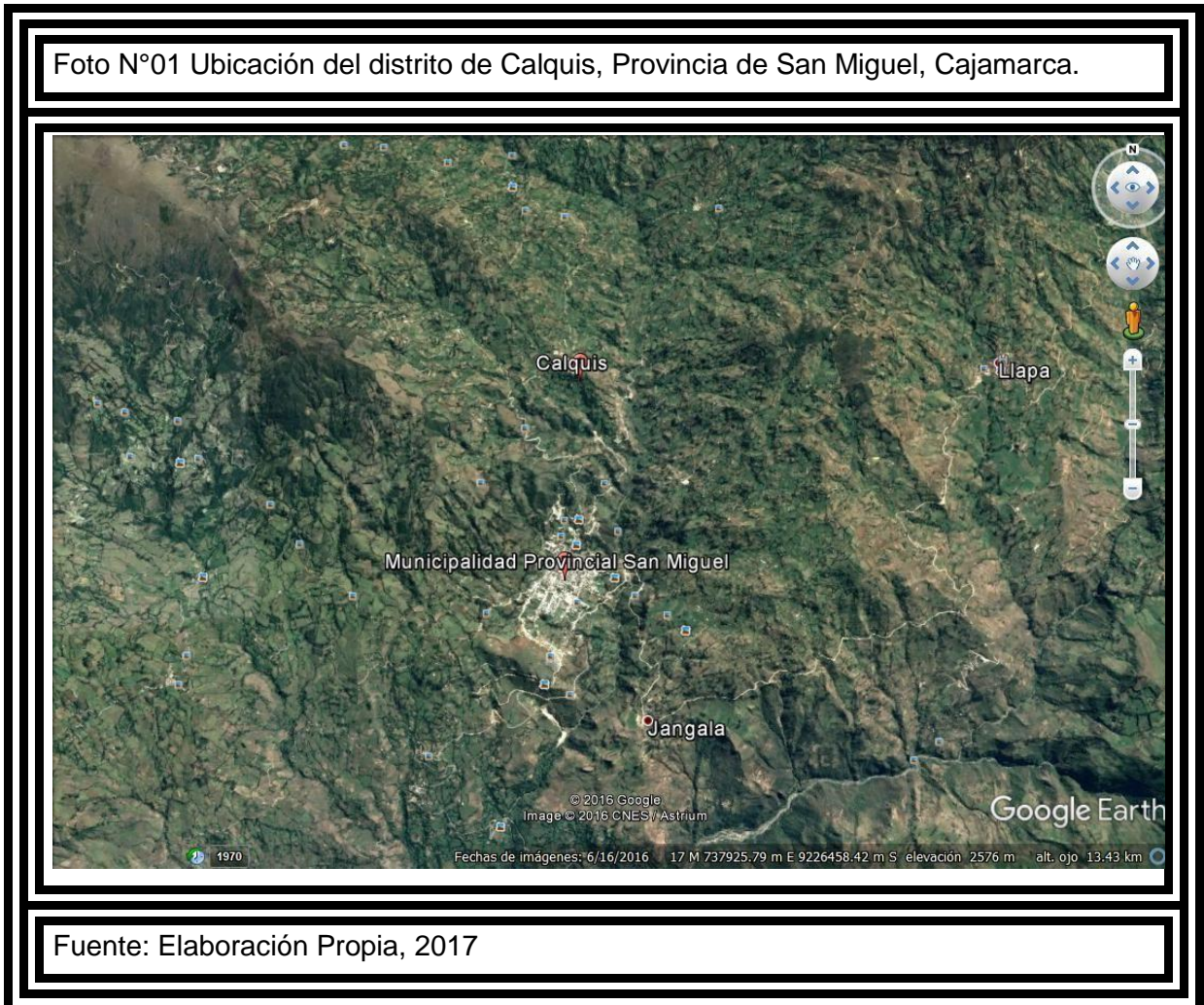
Para un nivel de significancia del 95 %, se observa que experimentalmente para los datos de hidrofobicidad de cobre en función de su recuperación por la influencia del pH, el $F_0 = 177.81$ es mayor a $F_{0.05, 2, 18} = 3.55$, obtenido de manera tabular, afirmando de este modo la hipótesis Alternativa. Esto indica, por lo tanto, que la influencia del pH si afecta significativamente en la hidrofobicidad del cobre en función de su recuperación.

Para un nivel de significancia del 95 %, se observa que experimentalmente para los datos de recuperación de cobre con la influencia de la densidad de pulpa en % de sólido, el $F_0 = 376.99$ es mayor a $F_{0.05, 2, 18} = 3.55$, obtenido de manera tabular, afirmando de este modo la hipótesis Alternativa. Esto indica, por lo tanto, que la influencia de la densidad de pulpa si afecta significativamente en la hidrofobicidad del cobre en función de su recuperación.

Para un nivel de significancia del 95 %, se observa que experimentalmente para los datos de hidrofobocidad de cobre en función de la recuperación de cobre por la influencia del pH y la densidad de pulpa, el $F_0 = 15.96$ es mayor a $F_{0.05,4,18} = 2.93$, afirmando de este modo la hipótesis Alternativa. Esto indica, por lo tanto, que el pH y la densidad de pulpa sí afectan significativamente en la hidrofobocidad del cobre en función de su recuperación.

ANEXOS

Anexo N° 1.- Fotos de la de Ubicación Geográfica distrito de Calquis, Provincia de San Miguel, Cajamarca



Anexo N°02. Ubicación del mineral

Foto N°02. Mineral polimetálico del sur de Cajamarca en el distrito de Calquis, provincia de San Miguel.



Fuente: Elaboración Propia, 2017

Anexo N° 03. Muestreo

Foto N°03 Cabando para la toma de muestra



Fuente: Elaboración Propia, 2017

Anexo N°04. Procedimiento en el laboratorio

Foto N°04. El mineral



Fuente: Elaboración Propia, 2017

Foto N°05: Molienda del mineral



Fuente: Elaboración Propia, 2017

Foto N°06: Secado del mineral



Fuente: Elaboración Propia, 2017

Foto N°07: Extracción del concentrado de cobre



Fuente: Elaboración Propia, 2017

Foto N°08. Extracción del concentrado de cobre



Fuente: Elaboración Propia, 2017

Foto N°09: Ensayo de espectrofotometría



Fuente: Elaboración Propia, 2017

Anexo N°05: Puntos porcentuales de la distribución F0.05, v1, v2

V ₂ \ V ₁	Grados de libertad del numerador (V ₁)																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	inf.
2	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3	254.3
3	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50
4	10.73	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
5	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
6	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36
7	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
8	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
9	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
10	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
11	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
12	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.52	2.49	2.45	2.40
13	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
14	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
15	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
16	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
17	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
18	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
19	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
20	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
21	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
22	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
23	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
24	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
25	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
26	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
27	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69
28	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67
29	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65
30	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64
40	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
60	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
120	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
Inf.	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.55	1.43	1.35	1.25
Inf.	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.85	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00