



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA



“IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS PARA EL
CONTROL DE LA CALIDAD Y LA MEJORA CONTINUA EN UNA INDUSTRIA
MINERA”

TESINA

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

YASVET YARENI ANDRADE AVILA

ASESOR ACADÉMICO:

DRA. EN C.M SANDRA LUZ MARTÍNEZ VARGAS

ASESOR EXTERNO:

I.M.M CITLALLI I. ORTEGA JARILLO

TOLUCA, EDO. MÉX.

*“La dicha de la vida consiste en tener siempre algo que hacer, alguien a quien
amar y alguna cosa que esperar”*
Thomas Chalmers

AGRADECIMIENTOS

A dios por guiarme y darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento.

A mi familia, porque por ellos soy lo que soy. Gracias por haber fomentado en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida.

A mis padres por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos difíciles. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia, mi coraje para conseguir mis objetivos.

A mis hermanos por estar siempre presentes, acompañándome para poderme realizar.

A mis amigos, por su confianza y cariño. Mil palabras no bastarían para agradecerles su apoyo, su comprensión y sus consejos en los momentos difíciles.

A la Dra. Sandra Luz Martínez Vargas por su apoyo durante este proceso, sus consejos, su paciencia y motivación.

A la Ing. Citlalli I. Ortega Jarillo, gracias por confiar en mí e impulsar el desarrollo de este trabajo y darme la oportunidad de culminar esta etapa de mi vida.

Al personal de Minera Tizapa, por permitirme realizar este trabajo dentro de la empresa así como también por brindarme con las manos abiertas su apoyo y su confianza durante mi estancia profesional y el desarrollo de este trabajo.

Y a todas las personas que desinteresadamente me ayudaron a culminar mi carrera profesional.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	2
1.1 Antecedentes de la empresa	2
1.2 Proceso de extracción y separación de metales	2
1.2.1 Etapas de proceso de liberación o separación de minerales valiosos	4
1.2.2 Etapas de proceso de concentración de mineral valioso	6
CAPÍTULO 2. CONTROL DE CALIDAD DE PROCESOS	11
2.1 Gestión de calidad	11
2.2 Principios de gestión de calidad	11
2.3 Concepto de calidad	13
2.4 Evolución de la calidad	13
2.5 Herramientas de la calidad	15
2.6 Descripción de las siete herramientas básicas para la administración de la calidad	15
2.7 Teorías de calidad: Calidad total	19
2.8 Control Estadístico del Proceso	22
2.8.1 Definición del control estadístico del proceso	22
2.8.2 Fases de un control estadístico del proceso	22
2.8.3 Beneficios del control estadístico del proceso	24
2.8.4 Conceptos estadísticos básicos	25
2.9 Gráficos de control de procesos	28
2.9.1 Variabilidad en un proceso	28
2.9.2 Definición de gráfico de control de procesos	29
2.9.3 Tipos de Gráficos Control o Carta de Control (CC)	29
2.10 Análisis de capacidad de proceso	33
2.11 Construcción de gráficos de control	34
2.11.1 Gráficos de control por variables	34
2.11.2 Gráficos de control (x, R)	34
2.11.3 Gráfico de Levey-Jennings	36
CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DE UN MÉTODO ESTADÍSTICO PARA EL CONTROL DE LA CALIDAD Y LA MEJORA CONTINUA EN UNA INDUSTRIA MINERA	37
3.1 Proceso de ensaye por vía húmeda	38
3.2 Definición del problema	44
3.3 Causas del problema	45
3.4 Análisis de las causas del problema a resolver	47

3.5	Estrategias para la solución del problema: Plan de acción	62
	CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	66
	CONCLUSIONES	77
	BIBLIOGRAFÍA	78
	ANEXOS	

ÍNDICE DE CUADROS

1.1	Evolución de la calidad	14
1.2	Cuadro comparativo de teorías de calidad	20
1.3	Características de cartas control para atributos	31
1.4	Matriz de análisis de causas	49
1.5	Causas a atender en primera instancia	52
1.6	Estrategias de solución	64

ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Valores para gravedad y probabilidad de las posibles causas	50
1.2	Matriz de ponderación para probabilidad y gravedad	50
1.3	Ponderación para las posibles causas de ajuste de producto	51
1.4	Datos correspondientes a 25 lotes de concentrado de plomo producidos en los meses de Marzo y Abril de 2012	56
1.5	Datos correspondientes a 25 lotes de concentrado de zinc producidos en los meses de Marzo y Abril de 2012	58
1.6	Datos correspondientes a 25 lotes de concentrado de cobre producidos en los meses de Marzo y Abril de 2012	60
1.7	Datos correspondientes a 25 lotes de concentrado de plomo producidos en los meses de Junio y Julio de 2012.	69
1.8	Datos correspondientes a 25 lotes de concentrado de zinc producidos en los meses de Junio y Julio de 2012.	71
1.9	Datos correspondientes a 25 lotes de concentrado de cobre producidos en los meses de Junio y Julio de 2012.	73

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Diagrama de flujo del proceso de separación de los metales	4
1.2	Proceso de trituración	5
1.3	Molino de bolas	6
1.4	Celda de flotación	7
1.5	Cancha de lixiviación	8
1.6	Separador magnético	9
1.7	Criba de minerales	9
2.1	Principios de la gestión de la calidad	12
2.2	Ejemplo de diagrama de Pareto	16
2.3	Ejemplo de diagrama de Causa-Efecto	16
2.4	Ejemplo de histograma	17
2.5	Ejemplo de diagrama de flujo	17
2.6	Ejemplo de hoja de verificación	18
2.7	Ejemplo de diagrama de dispersión	19
2.8	Ejemplo de gráfico de control	19
2.9	Metodología de calidad de Ishikawa	21
2.10	Etapas del Control Estadístico del Proceso	24
2.11	Distribución normal	27
2.12	Gráfico de Levey-Jennings	31
3.1	Diagrama de flujo de análisis por absorción atómica	41
3.2	Diagrama de Causa-Efecto	47
3.3	Gráfico de control de Levey- Jennings plomo	57
3.4	Gráfico de control de Levey- Jennings zinc	59
3.5	Gráfico de control de Levey- Jennings cobre	61
4.1	Gráfico de control final plomo	70
4.2	Gráfico de control final zinc	72
4.3	Gráfico de control final cobre	74

RESUMEN

La empresa donde se desarrolló el presente trabajo pertenece al sector minero, este tipo de negocio centraliza sus actividades en la exploración, explotación y beneficio de minerales con contenidos metálicos, para producir concentrados, lo que conlleva que las propiedades de dichos concentrados cumplan con especificaciones de diferentes clientes. Inicialmente en el laboratorio de calidad de la empresa se hacía el seguimiento y medición de las características de los productos, para comprobar que estos cumplieran con los estándares de calidad establecidos por los clientes, sin considerar que a través del porcentaje de metales determinado por absorción atómica se podría obtener información sobre el proceso de extracción. En este sentido, durante el primer semestre de 2012 se presentó una diferencia en el porcentaje de los metales extraídos (concentrados metálicos), contra lo esperado. Para determinar si la técnica de absorción atómica del laboratorio de calidad (Ensaye de Espectrofotometría de Absorción Atómica) se estaba llevando a cabo correctamente o si el problema estaba en el proceso de extracción, se enviaron muestras a un laboratorio externo obteniendo resultados diferentes a los reportados por el laboratorio de la empresa. Después de un análisis de los métodos aplicados así como, de la interpretación de los datos, se determinó que los porcentajes de metales obtenidos fueron resultado de la falta de estandarización del análisis de absorción atómica y de variabilidad en el proceso de extracción. A raíz del problema antes citado y tomando en cuenta la naturaleza del proceso, como principal estrategia se decidió implementar en el área de Ensaye por Vía Húmeda un control estadístico de procesos de los concentrados metálicos, lo que permitiría determinar si el proceso de extracción presentaba variabilidad, y tomar las acciones necesarias si se llegará a presentar. Los resultados de la implementación del control estadístico del proceso se vieron reflejados en el 100% de la aprobación de las evaluaciones efectuadas a los procedimientos de las pruebas de Espectrofotometría por Absorción Atómica del área de Ensaye por Vía Húmeda y en el control del proceso de extracción, estableciendo con ello un proceso de mejora continua en la empresa minera.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la aplicación de técnicas estadísticas ha tomado importancia en el control de calidad y la mejora continua, ya que es conocido que *lo que no se mide no se puede controlar*, por ello la importancia de la aplicación de estas técnicas. Sin embargo, si no existe una adecuada identificación y selección de la técnica más idónea en función de las diferentes características de un proceso, el beneficio en la aplicación de estas se pierde. Y en este sentido, en el trabajo se presenta la aplicación del control estadístico en el laboratorio de calidad de la empresa Minera Tizapa S.A. de C.V, la cual produce concentrados de plomo, zinc y cobre.

Como se mencionó en el apartado anterior, los objetivos de este trabajo fueron, primero la evaluación del sistema de control de calidad que se tenía, después determinar las principales causas de la variabilidad de los resultados de los análisis hechos por Espectrofotometría de Absorción Atómica y, por último la propuesta de un sistema de control de calidad a través del control estadístico de procesos en el área de Ensaye por Vía Húmeda, para la técnica de Absorción atómica.

Este documento está conformado por los siguientes apartados, en el Capítulo I se presentan conceptos y teorías de calidad, información necesaria para abordar el problema. Los fundamentos del control estadístico de proceso y los tipos de gráficos de control y su aplicación se presentan en el Capítulo II; mientras que en el Capítulo III se incluye la metodología aplicada en este proyecto para lograr un control estadístico del proceso en el Laboratorio de Calidad, con el fin de reducir la variación del proceso y con ello de los parámetros del producto final. En el siguiente apartado se presentan los resultados de la implementación del control estadístico del proceso en esta empresa, y el impacto que se ha tenido en su proceso, se muestran las hojas de control, gráficas de control y se hace mención del software utilizado para la automatización de la construcción y análisis de los gráficos de control. Se termina este documento con las conclusiones del trabajo.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1 Antecedentes de la empresa

La empresa Minera Tizapa S.A. de C.V, donde se desarrolló el presente trabajo pertenece al sector minero y concentra sus actividades en la exploración y explotación de minerales con contenidos metálicos de oro, plata, plomo, zinc y cobre, para producir concentrados de plomo, zinc y cobre.

En mayo de 1992, se fundó Minera Tizapa, S.A. de C.V. en el sur del Estado de México. Minera Tizapa es una empresa subsidiaria de Industrias Peñoles, localizada en la comunidad de Tizapa, Municipio de Zacazonapan. Es una mina subterránea polimetálica, que produce concentrados de plomo que son tratados en Met-Mex y concentrados de zinc que son exportados a Japón. La compañía cuenta con una moderna planta productora de concentrados de zinc, plomo y cobre con una capacidad de producción de 800 mil toneladas de concentrado al año. En su misión, *agregar valor a los recursos minerales en forma sustentable*, queda de manifiesto el compromiso que la empresa tiene con sus clientes para ofrecer productos y procesos de calidad mientras que su visión es la de *ser la empresa mexicana más reconocida a nivel mundial de su sector, por su enfoque global, la calidad de sus procesos y la excelencia de su gente*.

1.2 Proceso de extracción y separación de metales

Las formas en la que los metales se encuentran en la corteza terrestre y como depósitos en los lechos de los mares depende de la reactividad que tengan con su ambiente, en especial con el oxígeno, azufre y dióxido de carbono. Por definición los minerales son sustancias inorgánicas naturales que poseen estructuras atómicas y composiciones químicas definidas. Y es la metalurgia extractiva el área en donde se estudian y aplican operaciones y procesos para el tratamiento de minerales o materiales que contengan una especie útil (oro, plata, cobre, otros), dependiendo el

producto que se quiera obtener, se realizarán distintos métodos de tratamiento (Wills, 1979).

Frecuentemente el término mineral se usa en un sentido más extenso para incluir cualquier cosa de valor económico que se extraiga de la tierra, en éste sentido una **mena** se describe como una acumulación de mineral en cantidad suficiente para permitir una extracción económica. La mayor parte de las menas son mezclas de minerales que es posible extraer y de material rocoso descrito como ganga.

La mena tal y como se extrae de la mina o en forma de “mineral en bruto” consiste de minerales metálicos valiosos y de desecho (ganga). El procesamiento de minerales o tratamiento de menas consiste en la extracción y preparación de la mena para la extracción del metal valioso, y de un producto final comercial de los minerales no metálicos y del carbón mineral o de piedra. En este proceso de extracción se debe regular el tamaño de la mena ya que, al ser un proceso de separación físico en la mezcla se tienen tanto granos de minerales valiosos como minerales de la ganga. Al regular el tamaño de la mezcla es posible producir una proporción enriquecida, o concentrado, que contiene la mayor parte de los minerales valiosos y una descarga o colas, que es un compuesto predominantemente de los minerales de la ganga.

En el procesamiento de minerales hay dos operaciones fundamentales, la liberación o separación de los minerales valiosos de los minerales de desecho o ganga y la concentración de esos valores (mena).

La separación de los minerales valiosos de la ganga se realiza por medio de una pulverización o molido, lo cual implica trituración y si es necesario molienda, hasta un tamaño de partícula tal que el producto sea una mezcla de partículas de mineral y de ganga relativamente limpias. El mineral valioso debe estar libre de la ganga.

En la Figura 1.1 se esquematiza con un ejemplo, el proceso completo de explotación de minerales, desde la extracción hasta la separación de los productos.

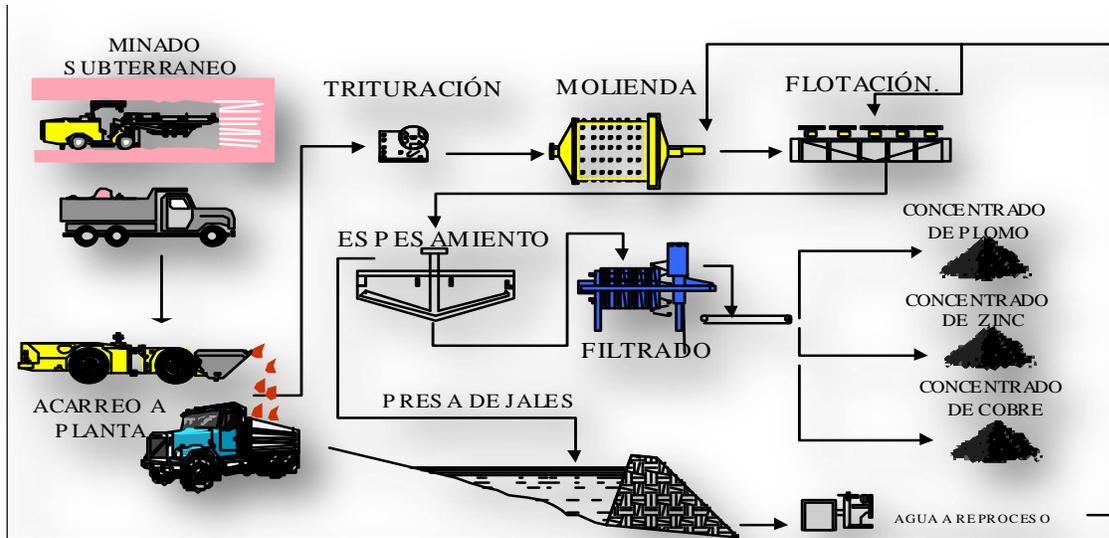


Fig.1.1 Diagrama de Flujo del Proceso de Separación de los metales. Fuente: Diagrama de operaciones de Minera Tizapa S.A. de C.V.

Las etapas de la metalurgia extractiva son: transporte y almacenamiento, conminución; clasificación, separación del metal de la ganga, y la purificación y refinación. A continuación se describen brevemente las principales etapas.

1.2.1 Etapas de proceso de liberación o separación de minerales valiosos

La **Trituración** es la primera etapa mecánica en el proceso de conminución en la cual el principal objetivo es la liberación de los minerales valiosos de la ganga. Generalmente la trituración es una operación en seco y se puede realizar en dos o tres etapas. Cuando los trozos de mena extraídos de la mina son tan grandes como 1.5 m, deben ser reducidos en la etapa de trituración primaria hasta un diámetro de 10 a 20 cm, dicha operación se lleva a cabo en máquinas trituradoras de trabajo pesado.

La segunda etapa de la trituración incluye todas las operaciones necesarias para aprovechar el producto de la trituración primaria, estas van desde el almacenamiento de la mena hasta la disposición del producto final de la trituradora. Al final de esta etapa el producto usualmente tiene un diámetro entre 0.5 - 2 cm. En la Figura 1.2 se

muestra una planta de trituración, en la que se incorporan las dos etapas de trituración (primaria y secundaria) y una etapa de lavado.

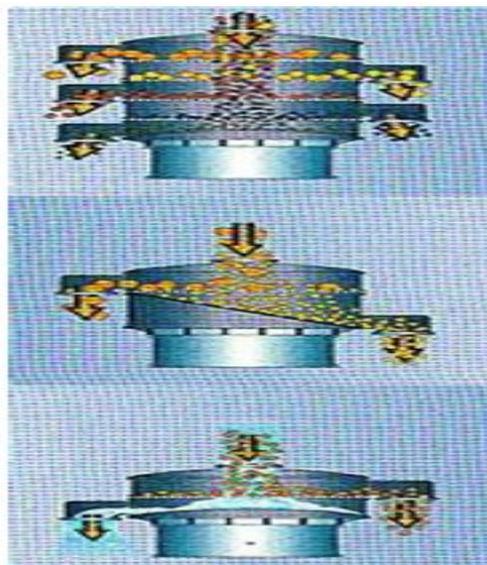


Fig.1.2 Proceso de Trituración. Fuente: Cortés Ruíz, 2010.

Para separar la mena al tamaño adecuado que permita su paso al siguiente proceso se utilizan cribas vibratorias, estas son colocadas delante de las trituradoras secundarias para remover el material fino o limpiar la alimentación y aumentar así la capacidad de la etapa de trituración secundaria.

Molienda: Es la última etapa del proceso de conminución de las partículas minerales. En ésta etapa se reduce el tamaño de las partículas por una combinación de mecanismos de quebrado de impacto y abrasión, ya sea en seco o en suspensión en agua. La molienda se realiza en recipientes cilíndricos rotatorios de acero que se conocen como molinos de rodamiento de carga, los que contienen una carga suelta de cuerpos de trituración, el medio de molienda, libre para moverse dentro del molino y pulverizar así las partículas de mena. El medio de molienda puede ser, bolas o barras de acero, roca dura y en algunos casos, la misma mena (molienda autógena). En la Fig.1.3 se muestra como un ejemplo los molinos de bolas.

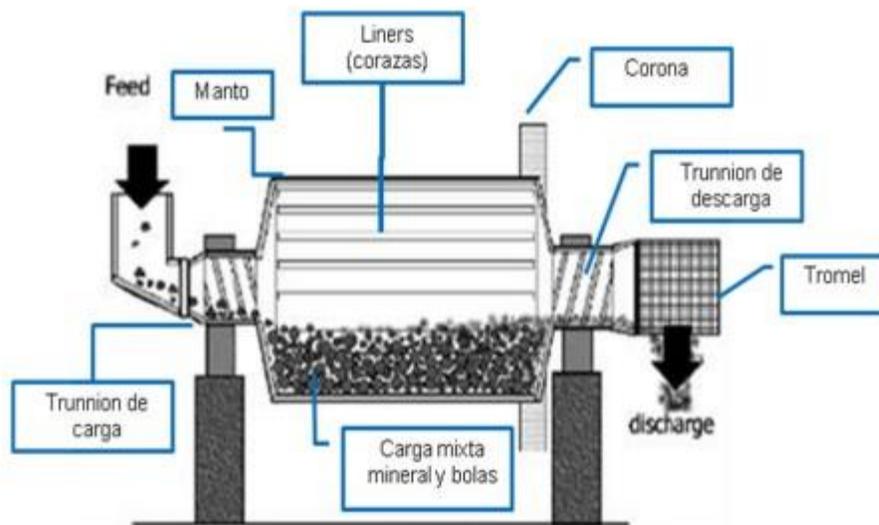


Fig.1.3 Molino de bolas. Fuente: Shcrushervip, 2012.

En el proceso de molienda, las partículas de entre 5 y 250 mm se reducen de tamaño entre 10 y 300 μm .

1.2.2 Etapas de proceso de concentración de mineral valioso

Después de que los minerales han sido liberados de la ganga, la mena se somete a un proceso de concentración, para separar los minerales en dos o más productos. La separación por lo general se logra utilizando alguna diferencia específica en las propiedades físicas o químicas entre el mineral valioso y los minerales de la ganga en la mena.

El procesamiento de minerales está relacionado principalmente con los métodos físicos de **Separación** los cuales pueden ser:

1. Separación que depende de las propiedades ópticas, radiactivas, etc. Este tipo de separación se conoce como clasificación, e incluía hasta hace poco la selección manual de las menas de alto grado.
2. Separación que depende de las diferencias en la gravedad específica. Este tipo de separación utiliza el movimiento diferencial de los minerales debido a los efectos de masa, por lo general en corrientes hidráulicas, y tiene la ventaja de

producir poca contaminación ambiental. Esta separación se puede llevar a cabo en equipos como un hidrociclón y la mesa Winfield.

3. Operaciones físicas. Las operaciones que se utilizan para separar son el triturado y la filtración a presión o al vacío, centrifugado, decantado, flotación, disolución, destilación, secado, precipitación física.

4. Operaciones químicas: en estas están la tostación, oxidación, reducción, hidrometalurgia, electrólisis, hidrólisis, lixiviación. La separación se lleva a cabo mediante reacciones ácido-base, precipitación química, electrodeposición y cianuración.

Después de la separación se lleva a cabo la operación de **Flotación en Espuma**, esta tiene como objetivo la concentración de minerales. La operación de flotación consiste en ajustar propiedades químicas de las partículas de la pulpa proveniente del proceso de molienda mediante varios reactivos químicos, que propicia que los minerales valiosos desarrollen avidez por el aire (aerofílicos) y que los minerales de la ganga busquen el agua y rechacen el aire (aerofóbicos). Por medio de la agitación por burbujas de aire es posible una separación, propiciando la transferencia de los minerales valiosos a las burbujas de aire que forman la espuma flotante a la superficie de la pulpa, como se muestra en la Figura 1.4.

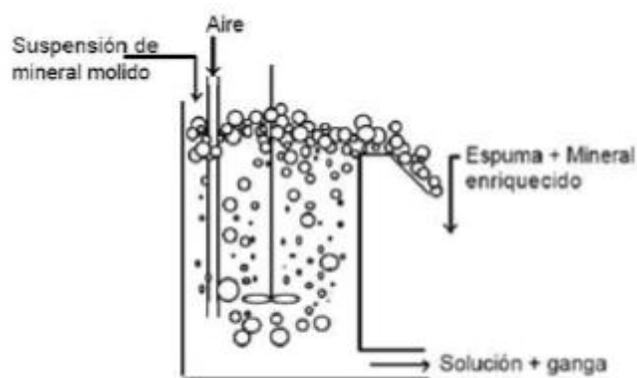


Fig.1.4 Celda de Flotación. Fuente: Cortés Ruíz, 2010.

Posteriormente, se somete la mena a una operación de **Lixiviación**. Este es el proceso por medio del cual se disuelve el mineral deseado en un disolvente que se ha seleccionado. El problema de la lixiviación es determinar las condiciones mecánicas, químicas y económicas mediante las que se obtenga una disolución máxima del metal deseado. En la Figura 1.5 se muestra como ejemplo una cancha de lixiviación.

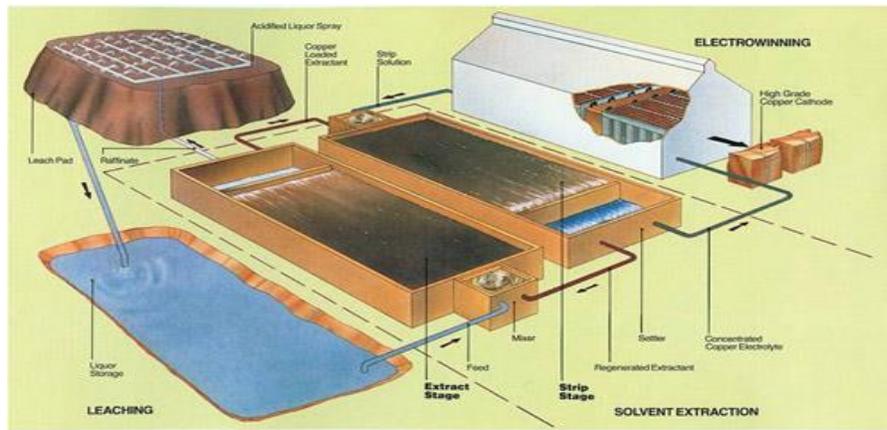


Fig.1.5 Cancha de lixiviación. Fuente: CODELCO, 2012.

La siguiente etapa es una **Separación Magnética**, esta depende de las propiedades magnéticas de la mezcla. Los separadores magnéticos de baja intensidad se usan para concentrar minerales ferro-magnéticos tales como la magnetita, mientras que los separadores magnéticos de alta intensidad se usan para separar minerales paramagnéticos de su ganga. En la Figura 1.6 se muestra separador magnético a nivel industrial.

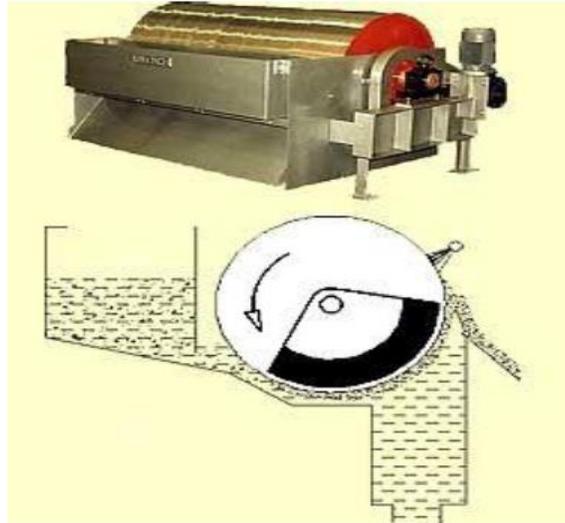


Fig.1.6 Separador magnético. Fuente: Cortés Ruíz, 2010.

Por último, se realiza un **Cribado o Tamizado**, que consiste en seleccionar y clasificar los minerales de acuerdo al índice de finura obtenida durante la molienda. Esta operación separa por diferencia de tamaño los materiales útiles de las gangas, y para llevarla cabo se utilizan telas o aminas perforadas conocidas como tamices o cribas. Los tamices se colocan verticalmente en orden creciente de superior a inferior, dichos conjuntos generalmente están accionados por dispositivos que producen vibraciones, para favorecer la separación en un tiempo menor. En la Figura 1.7 se muestra un juego de tamices a nivel industrial.



Fig.1.7 Criba de minerales. Fuente: Longji, 2010.

En la empresa minera donde se desarrolló este trabajo se llevan a cabo las operaciones antes descritas, y el control de estas permite asegurar la calidad de sus concentrados. En el siguiente capítulo se presentan conceptos y teorías de calidad, que fueron base para la propuesta de mejora continua de la empresa.

CAPÍTULO 2. CONTROL DE CALIDAD DE PROCESOS

2.1 Gestión de Calidad

Actualmente las empresas están inmersas en un fenómeno económico global, con ello se ven obligadas a ser competitivas y elementos claves para esto son, la reducción de gastos en sus procesos y el incremento de su productividad, es decir la optimización de sus procesos a través de mantener la calidad de éstos.

Con base a esto, es posible definir a la Gestión de Calidad como la coordinación de actividades mediante las cuales se consigue el logro de los objetivos de la empresa. Es decir, uno de los elementos más importantes en una organización es generar productos y/o servicios que cumplan con las especificaciones requeridas por el cliente y con la normatividad aplicable, para ello la empresa recurre a los sistemas de gestión de calidad los cuales le permiten administrar las actividades y la documentación necesaria de las distintas áreas que la conforman.

2.2 Principios de Gestión de Calidad

Una empresa se puede conducir y operar de forma exitosa a través de un control sistemático, y para ello es necesario implementar y mantener un sistema de gestión que este dedicado para la mejora continua de todos sus procesos, tanto administrativos como productivos.

En particular, en la empresa donde se llevó a cabo este trabajo, se ha establecido un sistema de gestión de calidad tomando como base los ocho principios sustentados en las normas de la serie ISO 9000¹ (ver Figura 2.1).

¹ La serie de Normas ISO 9000 son un conjunto de enunciados, los cuales especifican que elementos deben integrar el Sistema de Gestión de la Calidad de una Organización y como deben funcionar en conjunto estos elementos para asegurar la calidad de los bienes y servicios que produce la Organización.

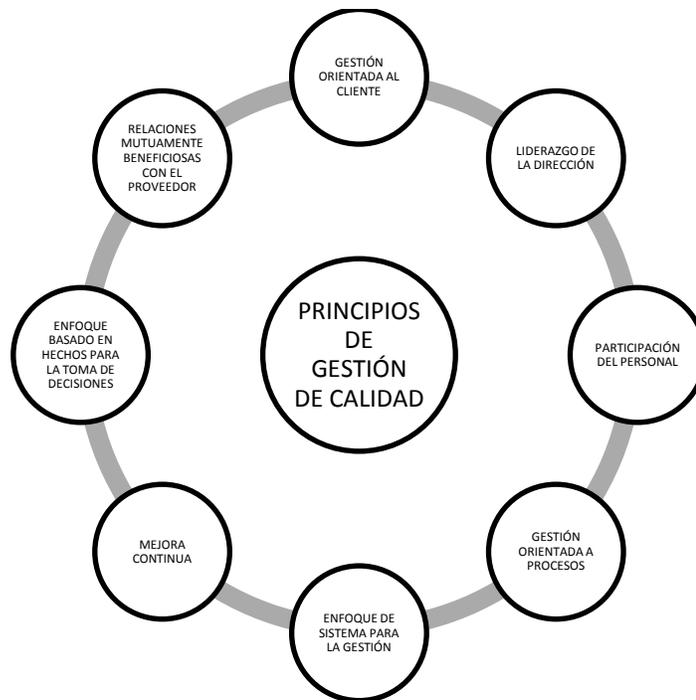


Fig. 2.1 Principios de Gestión de Calidad. Fuente: James, 1997.

De acuerdo a la Fig. 2.1, en los ocho principios de la gestión de calidad se tiene como objetivo último suministrar productos con un nivel de calidad que satisfaga a los clientes y que simultáneamente consiga la motivación y satisfacción de los empleados, gracias a un proceso de mejora continua en los procesos de la organización o que se relacionan con la misma de forma directa (James, 1997).

Es decir, al aplicar los principios de gestión de calidad es posible dirigir una empresa de forma exitosa, ya que se consideran todos los factores y las áreas involucradas. En este trabajo se consideran principalmente los principios de *mejora continua* y *en la gestión orientada al cliente*. Ya que se tiene como propósito orientar los esfuerzos de la empresa a mantener la calidad de sus productos y elevar la productividad de sus procesos, a través de la implementación de un control estadístico de procesos.

2.3 Concepto de calidad

Entre las principales definiciones de calidad (López, 2006), sobresalen las siguientes:

- * Para J.M. Juran (1990) la calidad es, *la idoneidad para el uso*.
- * A. Feigenbaum (1987) define a la calidad como *el conjunto de las características del producto (bien o servicio) de marketing, ingeniería, fabricación y mantenimiento a través del cual el producto satisface las expectativas del cliente*.
- * La calidad para B. Crosby (1987) es el *cumplimiento de unas especificaciones o la conformidad de unos requisitos*.
- * Por último, para W.E. Deming (1989) la calidad es *un grado predecible de uniformidad y habilidad a bajo costo y adecuado a las necesidades del mercado*.

De las definiciones anteriores es posible concluir que, la calidad depende de las propiedades y características del producto o servicio, y que para éste sea de calidad debe de satisfacer las necesidades del consumidor, y finalmente que los productos de calidad deben cumplir especificaciones o requisitos, así como también deben ser aptos para su uso o consumo.

Analizando detenidamente todo lo expuesto anteriormente, es posible definir la calidad como un conjunto de propiedades y características de un producto o servicio que le confiere su aptitud para satisfacer unas necesidades expresadas o implícitas.

2.4 Evolución de la calidad

El concepto de calidad ha evolucionado a lo largo del siglo XX, a partir de 1949 las industrias manufactureras se centran en producir en serie con calidad. En esta etapa la calidad en los procesos y servicios era el aspecto más importante, se reconocía la importancia de *trabajar bien a la primera*, para la reducción de costos y satisfacer las demandas de los clientes.

Actualmente la política de calidad que la mayoría de las empresas u organizaciones adoptan es la calidad total, lo que les permite garantizar la calidad en todas las etapas

de un proceso, mediante controles estrictos de éste. Es decir, al mejorar el control se disminuye el número de unidades o lotes defectuosos y se mejora la productividad y la fiabilidad. Sin embargo, el control del proceso no puede garantizar la calidad del producto, ya que por mucho que se controle este es imposible garantizar totalmente la calidad de un producto que este mal diseñado o de un producto fabricado con materiales mal elegidos (Bravo, 1994).

En el siguiente cuadro se muestra la evolución de la calidad desde el trabajo artesanal a la fecha.

Cuadro 1.1 Evolución de la calidad

Etapa	Concepto	Finalidad
Artesanal	Hacer las cosas bien independientemente del coste o esfuerzo necesario para ello	<ul style="list-style-type: none"> • Satisfacer al cliente • Satisface al artesano, por el trabajo bien hecho • Crear un producto único
Revolución Industrial	Hacer muchas cosas no importando que sean de calidad	<ul style="list-style-type: none"> • Satisfacer una gran demanda de bienes • Obtener beneficios
Segunda Guerra Mundial	Asegurar la eficacia del armamento sin importar el costo, con la mayor y más rápida producción (Eficacia + Plazo = Calidad)	<ul style="list-style-type: none"> • Garantizar la disponibilidad de un armamento eficaz en la cantidad y el momento preciso
Postguerra (Japón)	Hacer las cosas bien a la primera	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar costes mediante la Calidad • Satisfacer al cliente • Ser competitivo
Postguerra (Resto del mundo)	Producir, cuanto más mejor	<ul style="list-style-type: none"> • Satisfacer la gran demanda de bienes causada por la guerra
Control de Calidad	Técnicas de inspección en producción para evitar la salida de bienes defectuosos	<ul style="list-style-type: none"> • Satisfacer las necesidades técnicas del producto
Aseguramiento de la calidad	Sistemas y procedimientos de la organización para evitar que se produzcan bienes defectuosos	<ul style="list-style-type: none"> • Satisfacer al cliente • Prevenir errores • Reducir costes • Ser competitivo
Calidad Total	Teoría de la administración empresarial centrada en la permanente satisfacción de las expectativas del cliente	<ul style="list-style-type: none"> • Satisfacer tanto al cliente externo como interno. • Ser altamente competitivo • Mejora Continua

Fuente: Chrabonneau, 2000.

2.5 Herramientas de calidad

El control de calidad se define como un sistema efectivo para integrar el desarrollo de ésta y asegurar su mantenimiento en una organización, de manera que sea posible el marketing, ingeniería, producción y servicio hasta el nivel más económico, a fin de lograr la satisfacción total del consumidor (Feigenbaum, 2007). Para ello, se implementan herramientas de calidad que permiten lograr y mantener el control de calidad del proceso en cada una de sus etapas.

Generalmente en una empresa, estas técnicas o herramientas se aplican en grupos multidisciplinarios y están orientadas a resolver o prevenir disconformidades, errores o problemas de calidad en producto o en un proceso. En este sentido, es usual que se presenten variaciones en las etapas de un proceso cuyas causas posibles son diversas, por ello no todas afectan por igual a la calidad del producto. Por ello, para tener un control del proceso, es importante identificar las causas que pueden ocasionar los problemas, y para establecer un diagnóstico preciso las herramientas estadísticas son una excelente ayuda, ya que permiten distinguir lo cierto de lo que no lo es y establecer con claridad las acciones necesarias para la mejora.

Las herramientas de calidad son técnicas sencillas de análisis y como se mencionó, se pueden aplicar como una metodología para identificar y resolver problemas, así como para mantener la calidad de procesos, productos y servicios. De las herramientas de calidad seis son estadísticas y una de análisis.

2.6 Descripción de las siete herramientas básicas para la administración de la calidad

A continuación se definen y listan las siete herramientas básicas para la administración de la calidad, entre estas están los gráficos de control de proceso.

1. Diagrama de Pareto: Es una gráfica de barras organizada de mayor a menor frecuencia, y permite comparar el nivel de importancia de todos los factores que intervienen en un problema o cuestión.

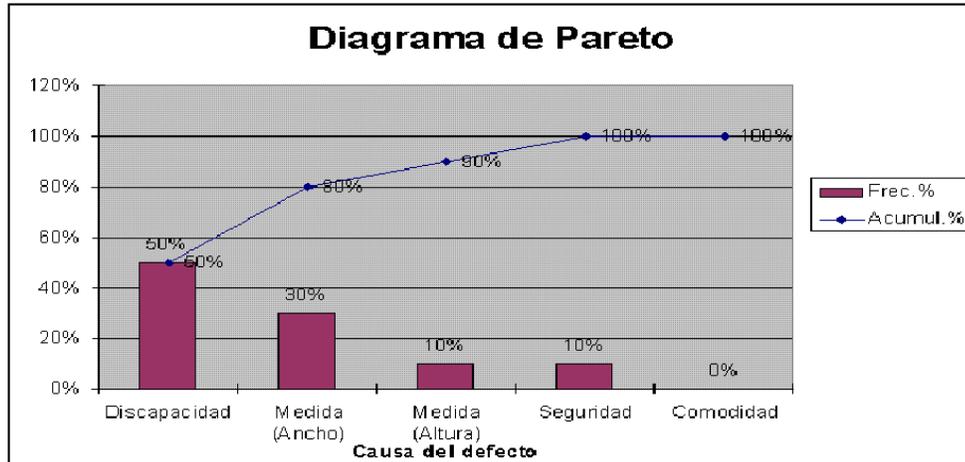


Fig. 2.2 Ejemplo de Diagrama de Pareto. Fuente: Jesús, 2009.

- Diagrama Causa-Efecto: Expresa gráficamente el conjunto de las variables o causas que intervienen en un proceso y la interacción de dichas causas, y con ello se puede comprender su efecto en un proceso o etapa de este y proponer soluciones al problema.

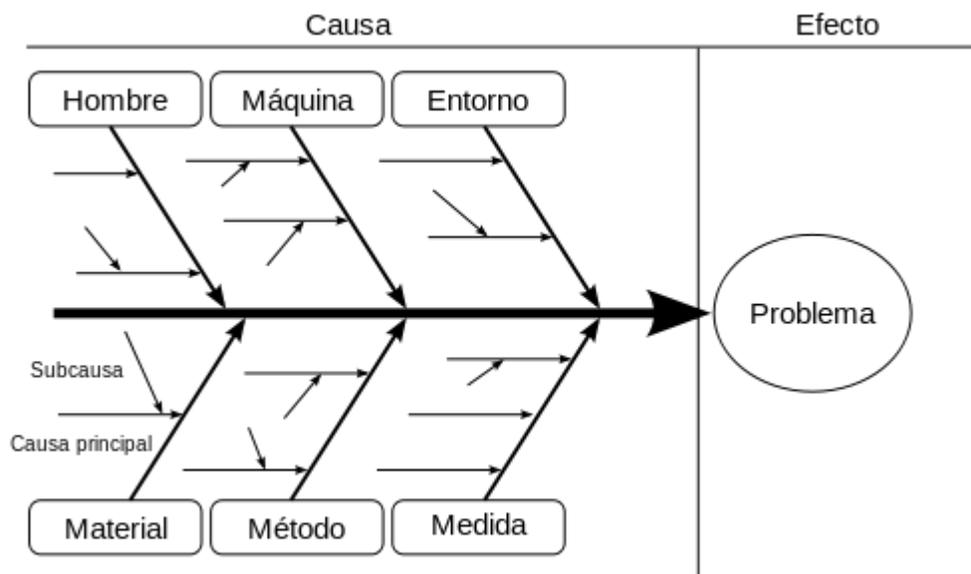


Fig. 2.3 Ejemplo de Diagrama de Causa-Efecto. Fuente: Caballero, 2010.

- Histograma: Es una gráfica de barras que muestra de forma visual la distribución de frecuencias de datos cuantitativos de una misma variable.

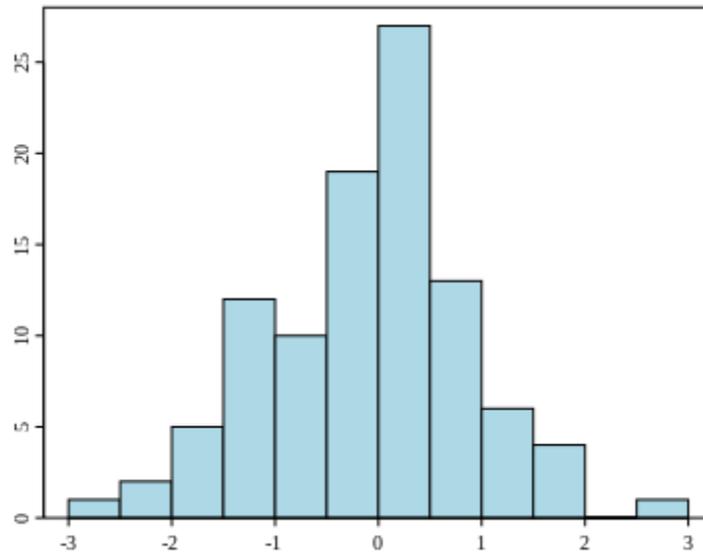


Fig.2.4 Ejemplo de Histograma. Fuente: Raulshc, 2013.

4. Diagrama de Flujo: Esta representación gráfica incluye la secuencia de etapas, operaciones, movimientos, decisiones y otros eventos que ocurren en un proceso. Esta representación se efectúa a través de formas y símbolos gráficos.

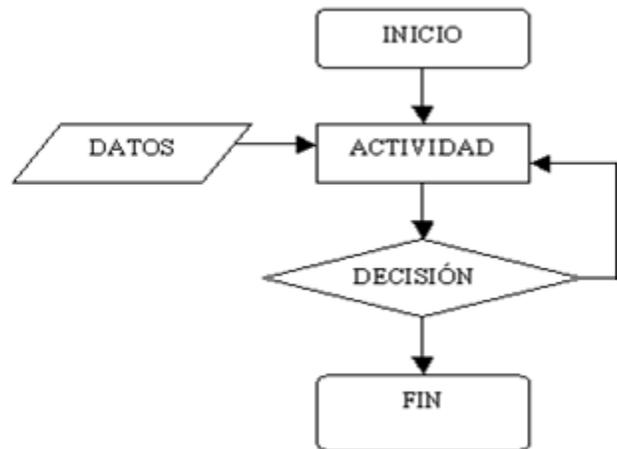


Fig.2.5 Ejemplo de Diagrama de Flujo. Fuente: Millán, 2008.

5. Hojas de Verificación: Esta herramienta se utiliza para la recopilación ordenada y estructurada de toda la información relevante que se genera en los procesos; es decir, se utilizan para verificar distribuciones del proceso de producción, defectos, causas y localización.

HOJA DE VERIFICACIÓN	No. _____																																																																																																																																																																																																						
NOMBRE DEL SERVICIO: _____	FECHA: _____																																																																																																																																																																																																						
AREA: _____	DELEGACIÓN: _____																																																																																																																																																																																																						
ESPECIFICACIÓN: _____	UNIDAD DE ADSCRIPCIÓN: _____																																																																																																																																																																																																						
No. DE INSPECCIONES: _____	NOMBRE DEL EMPELADO: _____																																																																																																																																																																																																						
OBSERVACIONES: _____	NOMBRE DEL GRUPO: _____																																																																																																																																																																																																						
DIMENSIONES																																																																																																																																																																																																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 20px;"></td> <td>1.5</td><td>1.6</td><td>1.7</td><td>1.8</td><td>2</td><td>2.0</td><td>2.1</td><td>2.2</td><td>2.3</td><td>2.4</td><td>2.5</td><td>2.6</td><td>2.7</td><td>2.8</td><td>3</td><td>3.0</td><td>3.1</td> </tr> <tr> <td>40</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>35</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>30</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>25</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>20</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>15</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>/</td><td></td><td></td><td></td><td>/</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>10</td><td></td><td></td><td></td><td>/</td><td></td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td></td><td></td><td>/</td><td>/</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>5</td><td></td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td> </tr> <tr> <td>0</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">FRECUECIA O TOTAL</td> <td>1</td><td>2</td><td>6</td><td>13</td><td>10</td><td>16</td><td>19</td><td>17</td><td>12</td><td>16</td><td>20</td><td>17</td><td>13</td><td>8</td><td>5</td><td>6</td><td>2</td> </tr> </table>		1.5	1.6	1.7	1.8	2	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	3	3.0	3.1	40																		35																		30																		25																		20																		15							/				/							10				/		/	/	/			/	/						5		/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	FRECUECIA O TOTAL	1	2	6	13	10	16	19	17	12	16	20	17	13	8	5	6	2	
	1.5	1.6	1.7	1.8	2	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	3	3.0	3.1																																																																																																																																																																																						
40																																																																																																																																																																																																							
35																																																																																																																																																																																																							
30																																																																																																																																																																																																							
25																																																																																																																																																																																																							
20																																																																																																																																																																																																							
15							/				/																																																																																																																																																																																												
10				/		/	/	/			/	/																																																																																																																																																																																											
5		/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/																																																																																																																																																																																						
0	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/																																																																																																																																																																																						
FRECUECIA O TOTAL	1	2	6	13	10	16	19	17	12	16	20	17	13	8	5	6	2																																																																																																																																																																																						

Fig.2.6 Ejemplo de Hoja de Verificación. Fuente: Manfenix, 2012.

6. Diagrama de Dispersión: Estos diagramas muestran si existe una relación entre las variables, es decir indican el grado de correlación lineal entre dos series de datos. Si se trata de una línea recta con pendiente positiva se trata de una correlación perfecta positiva, y existe una correlación perfecta negativa si se trata de una línea recta con pendiente negativa.

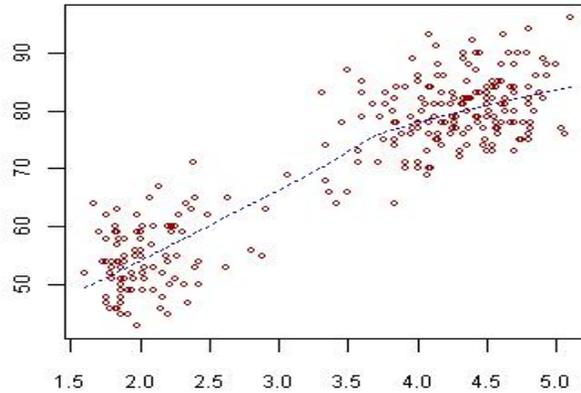


Fig.2.7 Ejemplo de Diagrama de Dispersión. Fuente: Nwstephens, 2006.

7. Graficas de Control: Representación gráfica de los distintos valores que toma una característica correspondiente a un proceso. Permite observar la evolución de este proceso en el tiempo y compararlo con unos límites de variación fijados de antemano y que se usan como base para la toma de decisiones. Esta es la herramienta que se utilizó para el desarrollo de este trabajo, y se abordará con más detalle en el otro apartado.

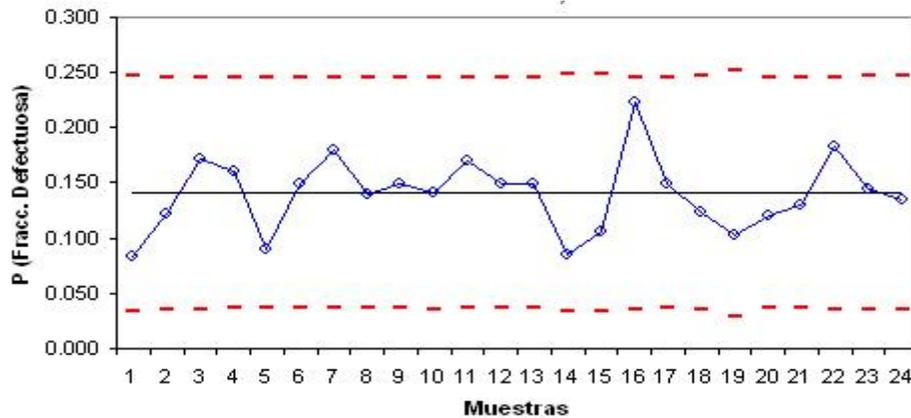


Fig. 2.8 Ejemplo de Gráfico de Control. Fuente: Hernández, 2009.

2.7 Teorías de Calidad: Calidad Total

Existen varias teorías que definen a la calidad y que le dan un enfoque específico. En el Cuadro 1.2 se muestra una comparación de cada teoría de la calidad, posteriormente

se hará énfasis en la teoría de Kaoru Ishikawa, esto obedece a que se considera dentro de las políticas de calidad de la empresa donde se desarrolló el presente trabajo.

Cuadro 1.2 Cuadro comparativo de Teorías de Calidad

Características	Deming	Juran	Crosby	Ishikawa	Taguchi
Definición de calidad	Sistema sin fallas	Conformidad con las especificaciones	Conformidad con los requerimientos	Uniformidad en los objetivos	Desempeño respecto a los requerimientos del cliente
Orientación hacia la calidad	Técnica	Proceso	Motivacional	Revolución conceptual	Técnico proactivo
Objetivos de la calidad	Cumplir las necesidades del cliente	Satisfacer las necesidades del cliente	Cero imperfecciones	Mejoramiento continuo	Cumplir los requerimientos del cliente
Método para lograr la calidad	Estadístico	Planeación, Control y Mejoramiento	Marco de 14 puntos	Modalidad Japonesa. Control Total de la Calidad	Procesos y Diseños Robustos
Decisión	Optimizar la medición directa de la calidad.	Minimizar la medición directa de la calidad	Medición directa de la calidad para implementación cero imperfecciones	Optimizar medición directa de la calidad; cero imperfecciones	Optimizar medición directa de la calidad
Objetivo del Programa	Mejorar posición competitiva	Disminuir el costo de la calidad	Disminuir costos	Mejoramiento continuo (Kaizen)	Eficacia de la calidad del diseño

Fuente: Elaboración propia

Kaoru Ishikawa

“La calidad total empieza con la educación y termina con la educación”

Kaoru Ishikawa

(石川馨 Japón, 1915 – 1989). Ishikawa nació en Japón en 1915, y fue el primero en utilizar el concepto de Control de la Calidad Total, y desarrolló las siete herramientas básicas para la administración de la calidad. Fue el primer autor que intentó destacar las diferencias entre los estilos de administración japonés y occidentales, su aporte fue la implementación de sistemas de calidad adecuados al valor del proceso en una empresa. Ishikawa define a la calidad como: *Desarrollar, diseñar, manufacturar y mantener un producto de calidad que sea el más económico, útil y siempre satisfactorio para el consumidor* (Bravo, 1994).

Metodología de Calidad de Ishikawa

La metodología que se utiliza en esta teoría muestra los pasos a seguir para la solución de un problema (ver Figura 2.9), dicha metodología se tomó como base para la solución del problema tratado en este trabajo.

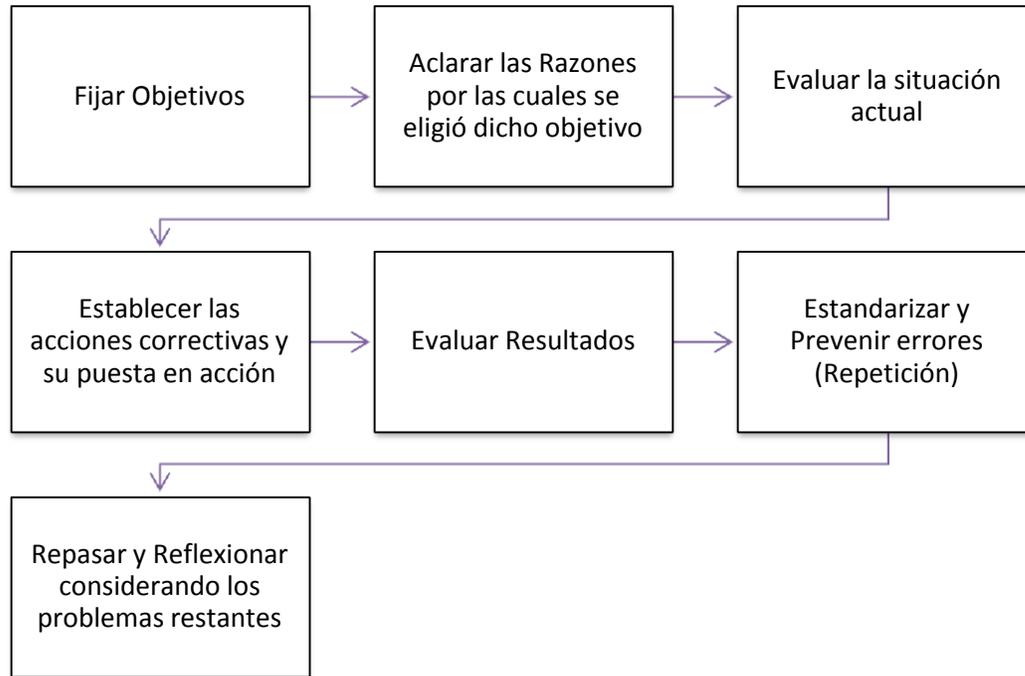


Fig.2.9 Metodología de Calidad de Ishikawa. Fuente: Bravo, 1994.

Se ha abordado el tema de gestión de calidad que permite tener un amplio conocimiento de la importancia de este tema en procesos industriales y de las principales herramientas básicas para la administración de la calidad, en el siguiente apartado se abordaran los fundamentos teóricos del control estadístico de procesos, que como ya se mencionó es la herramienta que se aplicó para la solución del problema.

2.8 Control Estadístico de Procesos

2.8.1 Definición de control estadístico de procesos

El Control Estadístico de Procesos (CEP), una de las más grandes aportaciones del Dr. Deming, es una colección de herramientas para la resolución de problemas, y aplica el análisis estadístico para medir, monitorear y controlar procesos por medio de gráficos de control. El CEP se utiliza para asegurar que los procesos cumplan con los estándares de calidad establecidos.

El principal objetivo del CEP es proporcionar una señal estadística cuando aparezcan causas de variación imputables (problemas corregibles), y lograr una alta calidad del producto reduciendo costos de producción al minimizar los defectos del producto. Se dice que un proceso se encuentra bajo control estadístico cuando las únicas causas de variación son causas especiales.

2.8.2 Fases de un Control Estadístico de Procesos

Un programa de control estadístico para un proceso requiere la ejecución de dos fases (Montgomery, 2004):

Fase 1: En esta fase se toman las mediciones para estimar parámetros fundamentales, como el promedio y la desviación estándar de la variable que se está midiendo. Con base en dichas estimaciones se calculan los límites de control, bajo el supuesto de que las observaciones siguen una distribución normal: $LSC = \mu + L\sigma$; $LIC = \mu - L\sigma$, siendo L la distancia de los límites de control a la línea central. En general, se utilizan límites de tres sigmas alrededor del promedio. Posteriormente, se construye un gráfico de prueba conformado por una línea recta horizontal a la altura del promedio y otras dos líneas rectas a la altura de los límites de control.

Un gráfico de control estadístico de procesos inicial muestra las observaciones usadas en el cálculo de los límites de control. Dichas observaciones se analizan para verificar si se cumple la hipótesis de que la variabilidad del proceso se debe sólo a causas aleatorias o si, por el contrario, existen causas asignables de variación. Esto se puede

verificar, ya que cuando la fluctuación de las mediciones se debe a un sistema constante de causas aleatorias, las observaciones siguen una distribución normal. Si no se descubren causas asignables, entonces se adoptan los límites de control calculados como definitivos, y se construyen gráficos de control con esos límites. En caso de existir pocos puntos fuera de control, se eliminan, se reestiman los parámetros y los límites de control con los restantes puntos, y se construye un nuevo gráfico de prueba.

Cuando las observaciones no siguen un patrón aleatorio, indicando la existencia de causas asignables, es necesario identificarlas y eliminarlas. Una vez hecho esto, se deberán tomar nuevas observaciones y calcular nuevos límites de control de prueba.

Fase 2: En esta fase las nuevas observaciones del proceso se representan en el gráfico de control, verificando que ellas estén dentro de los límites y que no se observen patrones no aleatorios. El 99.8% de las observaciones deben estar dentro de los límites de 3 sigmas más/menos de la media. Esto significa que sólo una observación en 500 (0.2% de las observaciones) puede ser por causas aleatorias, fuera de los límites de control. Cuando hay más de un punto fuera de los límites de control, significa que el sistema de causas aleatorias que provoca la variabilidad habitual de las observaciones se ha alterado por la aparición de alguna causa asignable; es necesario entonces descubrir y eliminar dicha causa para que el proceso retorne a control.

En el siguiente diagrama se muestra el orden de las etapas que se deben de llevar a cabo para cubrir las dos fases antes descritas.

Etapas del Control Estadístico del Proceso

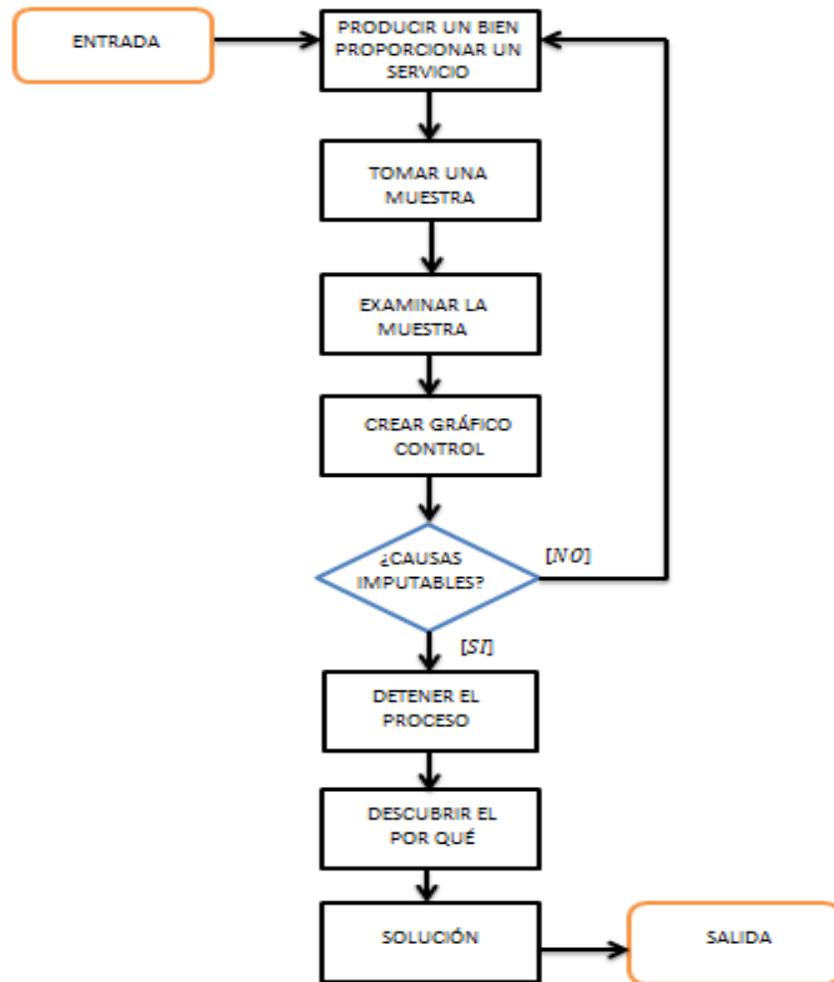


Fig.2.10 Etapas de un CEP. Fuente: Elaboración propia.

2.8.3 Beneficios del Control Estadístico de Procesos

Como se mencionó antes, el CEP es una actividad de valor agregado con beneficios tangibles, entre éstos sobresalen los siguientes,

- Mejora de la calidad de los productos al poder reaccionar en tiempo real evitando defectos.
- Evita ajustes innecesarios.
- Mejora de la satisfacción del cliente.
- Proporciona información de diagnóstico.

- Identifica los cuellos de botella, paradas y otros tipos de espera dentro del proceso. (Montgomery, 2004)

Además, como resultado de la aplicación del CEP son posibles las reducciones del tiempo de ciclo del proceso dando como resultado mejoras de rentabilidad (Oakland, 2002). Es decir, el CEP es una herramienta valiosa que puede incidir en la reducción de gastos y en la satisfacción del cliente. Por lo anterior, el control estadístico de procesos tiene una clara ventaja frente a los métodos de calidad como inspección, que aplican recursos para detectar y corregir problemas al final del producto o servicio, cuando ya es demasiado tarde.

Para que el CEP se pueda aplicar con eficacia es fundamental que el muestreo sea de calidad y que sea representativo de los procesos.

2.8.4 Conceptos Estadísticos Básicos

En esta sección se abordan de manera general, conceptos básicos de estadística que son base para la construcción de gráficos de control.

- **Variable.** Es la representación general de un conjunto de datos que tienen una misma característica (Walpole, 1998). Es el atributo o característica de interés, la cual puede clasificarse como cualitativa o cuantitativa. En una variable cualitativa, la medición describe un elemento, colocándolo en una categoría o grupo. En una variable cuantitativa, en cambio la medición da valores numéricos con los cuales pueden realizarse operaciones, como la suma o el promedio.
- **Muestra, n .** Elementos tomados de un conjunto de datos para proporcionar información sobre el mismo y, eventualmente, para tomar una decisión relativa al colectivo o al proceso que lo ha producido.
- **Frecuencia.** Es el número de elementos que contiene cada clase o categoría de conjunto de datos.
- **Medidas de Tendencia Central.** Indican mediante un valor o atributo la localización central de la distribución de frecuencias.

- **Media Aritmética (\bar{x})**. También llamada media o promedio, se define como la suma de todos los datos divididos entre el número de datos.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.1)$$

Donde:

\bar{x} : Media

x_i : Valor obtenido para la muestra i

n : Número de muestras

- **Mediana (Md)**. Es el valor central de un conjunto de valores ordenados en forma creciente o decreciente. Dicho en otras palabras, la mediana corresponde al valor que deja igual número de valores antes y después de él en un conjunto de datos agrupados
- **Moda (Mo)**. Es el valor que aparece con mayor frecuencia en un conjunto de datos.
- **Rango**. Es la medida de dispersión más simple y se obtiene como la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo del conjunto de datos.

$$R = (X_{\text{máxima}} - X_{\text{mínima}}) \quad (2.2)$$

R = Rango

$X_{\text{máxima}}$ = valor máximo de la característica medida

$X_{\text{mínima}}$ = valor mínimo de la característica medida

- **Varianza**. Se define como el promedio de los cuadrados de las desviaciones de los datos con respecto a la media.

$$\sigma^2 = \frac{\sum f_i (M_i - \bar{x})^2}{n} \quad (2.3)$$

Donde:

σ^2 : Varianza

f_i : Es el valor de la frecuencia del i -ésimo intervalo

M_i : Es el valor de la marca de clase del i -ésimo intervalo

\bar{x} : Media

n : Es el número de datos.

- **Desviación Estándar (s)**. Se define como la raíz cuadrada de la varianza su valor indica la forma en que están distribuidos los datos originales con respecto a la media.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum f_i(M_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2.4)$$

- Distribución normal.** Se define mediante dos parámetros, la media aritmética y la desviación estándar y presenta forma de campana simétrica respecto a la media. Para esta distribución, la media aritmética, la mediana y la moda coinciden en el mismo valor. Existe una relación fija entre las áreas bajo la curva y los valores de la variable tomados como diferencia relativa a la media. El saber que una variable se distribuye de forma normal presenta una importante ventaja; la media aritmética y la desviación típica o estándar son suficientes para hacer predicciones sobre el comportamiento de la variable. Por esto, la aplicación más frecuente es el cálculo de áreas debajo de la curva normal, es decir, el determinar con que probabilidad la variable asumirá un valor comprendido entre dos valores cualesquiera. A continuación se muestran los valores de área o probabilidad asociados a estos intervalos:

$x \pm 1s$, se encuentra el 68.26% de la población o área bajo la curva normal.

$x \pm 2s$, se encuentra el 95.46% de la población o área bajo la curva normal.

$x \pm 3s$, se encuentra el 99.73% de la población o área bajo la curva normal.

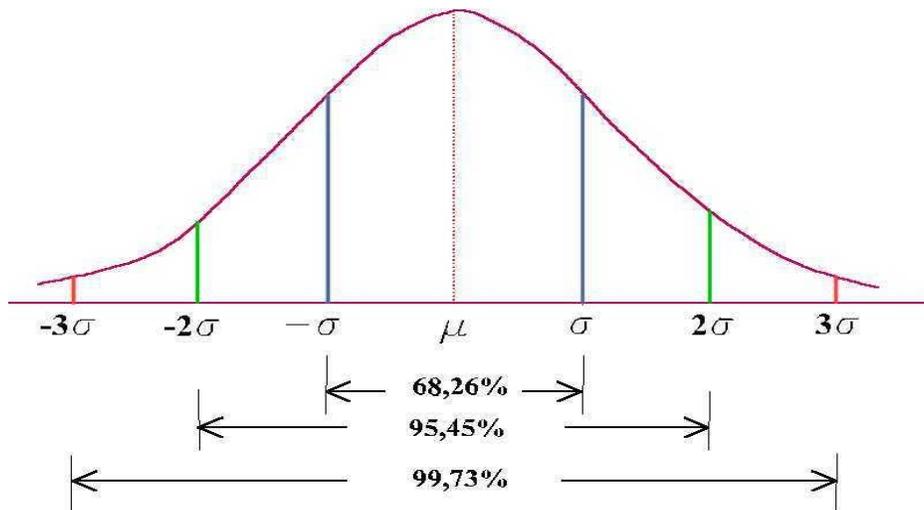


Fig. 2.11 Distribución Normal. Fuente: González, 2010.

Los conceptos antes citados son el fundamento de los siguientes capítulos, en donde se explicaran con detalle la aplicación del CEP en el Laboratorio de Calidad de una Industria Minera.

2.9 Gráficos de Control de Procesos

2.9.1 Variabilidad en un Proceso

Las técnicas estadísticas pueden mejorar la calidad de un proceso, cuando se emplean para describir, comprender y controlar la variabilidad que se presenta entre objetos que se han producido presumiblemente bajo las mismas condiciones.

En este contexto, la variabilidad de un proceso puede deberse a causas *aleatorias* y a causas *asignables*.

Las causas *aleatorias* o *comunes* corresponden al efecto acumulado de muchas causas inevitables y pequeñas; estas pueden ser originadas por la variabilidad de la materia prima, maquinaria distinta, diferente eficacia de la mano de obra, entre otras. Si un proceso opera únicamente con causas aleatorias de variación, entonces está bajo control, por ser estas causas parte inherente del proceso. Es decir, un proceso se encuentra bajo control estadístico cuando la variabilidad se debe sólo a causas comunes. Estas causas suceden en forma aleatoria, representando entre el 80 y 95% de la variabilidad de cualquier proceso.

Mientras que las causas *asignables* pueden estar presentes a la salida de un proceso, generando variaciones irregulares no predecibles. Son de naturaleza no aleatoria y cuando actúan producen efectos que se pueden identificar y que persisten hasta que se eliminen las causas que los generan. Ejemplos de estas causas son el desgaste de la máquina, herramientas en mal estado, la enfermedad de operarios. Un proceso que opera en presencia de causas asignables está fuera de control estadístico. Un objetivo esencial del sistema de control es que éste reaccione sólo cuando una causa tiene suficiente impacto, y es práctico y económico eliminarla para mejorar la calidad del proceso, producto o servicio.

Los gráficos de control ayudan en la detección de modelos no naturales de variación en los datos que resultan de procesos repetitivos y dan criterios para detectar una falta de control estadístico.

2.9.2 Definición de Gráfico de Control de Procesos

Como se mencionó en otro apartado, un gráfico de control de procesos tiene una línea central que representa el valor medio de la característica de calidad, correspondiente al estado bajo control, y se tienen otras dos líneas horizontales, llamadas Límite Superior de Control (LSC) y Límite Inferior de Control (LIC), como se mostró en la Figura 2.8.

Cuando los puntos muestrales se encuentran dentro de los límites LSC y LIC se dice que el proceso se encuentra controlado, si no es así se dice que el proceso está fuera de control. Mediante los gráficos de control se monitorea de forma visual la estabilidad de un proceso, representando la variabilidad de las mediciones para detectar la presencia de un exceso de variabilidad no esperable por puro azar, y probablemente atribuible a alguna causa específica que se podrá investigar y corregir.

2.9.3 Tipos de Gráficos de Control o Cartas de Control (CC)

Los gráficos de control se clasifican en Gráficos de Control para variables y Gráficos de Control para atributos.

Gráficas de Control para Variables: Son herramientas cuyo objetivo es controlar estadísticamente un proceso, detectando cuándo está fuera de control. Las gráficas de control más comunes son las Cartas de Shewhart.

Para la integración de las Cartas de Shewhart se examina el proceso a ser controlado, se toman m muestras a intervalos regulares, y de cada muestra se miden una o varias variables; las muestras correspondientes a un mismo intervalo constituyen un subgrupo. Los intervalos pueden definirse en términos de unidades de tiempo o de cantidad, y los valores medidos se comparan con los límites calculados. Los límites más comunes son los Límites de Tolerancia Natural (LTN) del proceso, estos límites

son entre los que se mueve el proceso de manera natural. Se utilizan como Límites de Control (LIC, LSC), paralelos a la línea central representativa del valor medio.

Cuando se analizan variables es necesario controlar tanto el promedio como la variabilidad de la característica de calidad. En cada subgrupo, se mide una cierta característica, y se estiman diversos estadísticos, como: media del subgrupo (μ), rango (R), desviación estándar (σ).

Si la característica a controlar es una variable continua, las medias de las muestras siguen aproximadamente una distribución normal $N(\mu, \sigma)$. En general, los límites de control están definidos por $LC = \mu \pm k\sigma$, donde el valor k depende del tipo de gráfica de control. Estos límites en general se estiman en la fase de estudio inicial, a partir de las observaciones de m subgrupos, siendo $m=25$ el más aplicado. Las cartas o gráficas de control más frecuentes para una sola variable son las CC Media-Rango (\bar{X} , R), CC Media-Desviación Estándar (\bar{X} , S) y CC para valores individuales (X_i).

Un segundo tipo de gráficas de control para variables son las Cartas de Control Media-Rango. En la integración de estas gráficas, para cada grupo se representan los valores (\bar{X} , R), si están comprendidos en el intervalo (LIC; LSC) entonces el proceso está bajo control; en caso contrario el proceso puede estar fuera de control. Es importante mantener bajo control tanto la media como la variabilidad del proceso en estudio.

Cartas de Control para Atributos (CCA): Las CCA se utilizan cuando la característica de calidad no puede ser cuantificada; sólo puede indicarse si ella está conforme o no con ciertas especificaciones (defectuoso - no defectuoso; conforme - no conforme). Así, se determina el número o porcentaje de unidades defectuosas en la muestra. Las CCA tienen gran aplicación en las actividades relacionadas con servicios y con mejoramiento de procesos fuera de la manufactura; pueden clasificarse como se indica en el Cuadro 1.3:

Cuadro 1.3 Características de Cartas Control para Atributos

Carta	Características
1. Carta p	• Fracción disconforme de unidades en una muestra de n unidades
2. Carta np	• Número de disconformidades
3. Carta c	• Número total de disconformidades por unidad.
4. Carta u	• Número promedio de disconformidades por unidad

Fuente: Montgomery, 2004.

Procedimientos Especiales para Control de Procesos: Algunas veces sucede que se dispone de datos sobre medias y desviaciones estándar de alguna variable medida, procedentes de diferentes fuentes. Puede ser conveniente aplicar una prueba de homogeneidad a dichos parámetros para identificar si hay evidencia de que las diferentes fuentes representan diferentes sistemas de causas. Los gráficos de control de \bar{X} y σ constituyen un procedimiento simple de prueba para este propósito.

Gráfico de Levey-Jennings: En cada gráfico se pondrán los valores de un control, en el eje X se representan los días del mes y en el eje Y el valor de la media y los valores de 1, 2 y 3 DS (desviación estándar), como se muestra en la siguiente figura.

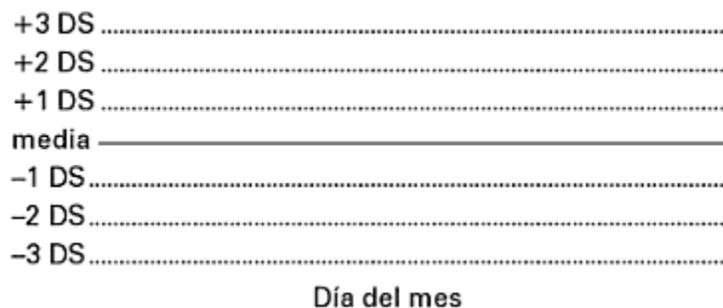


Fig.2.12 Gráfico de Levey-Jennings. Fuente: García, 2006.

Se van representando los valores del control a lo largo del tiempo, y cuando se tienen varios puntos sobre la gráfica, es posible obtener información sobre la precisión y la exactitud.

- Valores precisos: cuando los valores del control permanecen muy cerca de la media.
- Valores imprecisos: cuando existe dispersión de los valores obtenidos.
- Inexactitud: habrá una desviación de la media pero de modo diferente al anterior. En la gráfica se observa una tendencia o un desplazamiento.
- Tendencia: se distingue un cambio gradual en una dirección de los valores del control. Ocurre por el deterioro de los reactivos, del instrumental o de los estándares. Se desvía hacia arriba o hacia debajo de la media
- Desplazamiento: es un cambio brusco en los valores del control que luego se hace continuo. Suele ocurrir por la introducción de algo nuevo en el ensayo

Gráfico de Cusum: La gráfica de suma acumulada es una gráfica cronológica de la suma acumulada de las desviaciones de una muestra estadística que se alejan de un valor de referencia. La gráfica incorpora directamente toda la información contenida en la secuencia de los valores muestrales graficando las sumas acumuladas de las desviaciones que presentan los valores muestrales respecto al valor objetivo.

Gráfico de convergencia de Youden. En este gráfico se presentan los valores de dos controles: Eje X: media, 1, 2 y 3 DS de un control, y Eje Y: media 1, 2 y 3 DS del otro control. Las líneas se interceptan formando dos cuadrados. Se pueden observar las desviaciones sistemáticas y los valores de los dos controles según la posición que ocupen en la gráfica.

A continuación se listan algunas ventajas del uso de diagramas de control en procesos.

- a) El gráfico muestra descriptivamente como varía un proceso a lo largo del tiempo.
- b) Los gráficos de control son eficaces en la prevención de defectos. El objetivo básico del gráfico de control es detectar cualquier cambio en el proceso o en el producto.

c) Proporciona información sobre la capacidad del proceso. El gráfico suministra información sobre los parámetros básicos del proceso y sobre su estabilidad a lo largo del tiempo.

2.10 Análisis de Capacidad del Proceso

Luego que el proceso en estudio entra en control y se estabiliza, es necesario asegurar que tiene capacidad para operar dentro de ciertas especificaciones. La capacidad de un proceso se refiere a su uniformidad, siendo la variabilidad que presenta una medida de esta uniformidad. Por tanto, el proceso en control indica que está operando dentro de su variabilidad natural, pues las causas especiales han sido eliminadas. Sin embargo, es posible que el proceso no tenga capacidad para cumplir con ciertas especificaciones, aunque esté en control.

Usualmente se toma la dispersión seis sigmas en la distribución de la característica de calidad como una medida de la capacidad del proceso. Como ya se mencionó, bajo una distribución normal $N(\mu, \sigma)$, los límites de tolerancia natural del proceso son $\mu \pm 3\sigma$. Ellos incluyen el 99.73% de la variabilidad, quedando por fuera de esos límites de tolerancia el 0.27% de la salida del proceso, lo que representa 2.700 partes por millón disconformes.

En resumen, el análisis de capacidad de procesos (ACP) se puede realizar mediante histogramas de frecuencias, cartas de control y diseños experimentales. Es frecuente el análisis de la capacidad del proceso mediante histogramas, donde el histograma de una distribución normal tiene forma acampanada, simétrica, unimodal. Cuando se aleja de este patrón, es indicio de que en el proceso están actuando causas asignables que deforman la curva acampanada. En estos casos la predicción de la capacidad del proceso no es precisa. Las formas no acampanadas del histograma indican distribución asimétrica, o multimodal y las causas posibles pueden ser las diferencias en lotes de materia prima y diferentes proveedores, varios operadores en el proceso con criterios diferentes, mediciones hechas por operarios diferentes, con instrumentos diferentes o mal calibrados.

También es posible llevar a cabo un análisis de la capacidad del proceso mediante Índices de Capacidad, estos índices comparan la tolerancia de los Límites de Especificación (USL-LSL) con la amplitud de la variación real del proceso (6σ). Los principales índices son: capacidad potencial del proceso C_p , capacidad real C_{pk} , centrado del proceso K , índice Taguchi C_{pm} . Estos índices pueden analizarse a corto plazo y a largo plazo.

2.11 Construcción de Gráficos de Control

2.11.1 Gráficos de control por variables

Una característica variable de calidad es aquella que se puede medir según una escala de valores variable. Los diagramas de control por variables se usan ampliamente, suelen permitir el uso de procedimientos de control más eficientes y proporcionan más información respecto al rendimiento del proceso que los diagramas de control de atributos. Cuando se trata de una característica de calidad que es una variable, es una práctica estándar controlar el valor medio de la característica de calidad y su variabilidad.

2.11.2 Gráficos de control (\bar{x} , R)

El control de la media del proceso, o del nivel de calidad promedio, suele ejercerse con el diagrama de control de medias o diagrama de (\bar{x}). Es posible controlar la variabilidad del proceso mediante un diagrama de control de la amplitud llamado diagrama de R. Por lo general se utilizan diagramas \bar{x} y de R por separado para cada característica de calidad que interese. Al utilizar estos gráficos se parte de la hipótesis de que la distribución de las observaciones es normal.

Para el gráfico de control \bar{X}

1. Calcular la media de los valores puntuales de las muestras aplicando la ecuación 2.1
2. Calcular el Rango medio (\bar{R})

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_n}{n} \quad (2.5)$$

Donde:

\bar{R} : Rango medio

n : número de muestras

R_1 : Amplitud de la muestra

R_n : Rango de la muestra n

3. Calcular los límites de control superior (LSC_x) e inferior (LIC_x)

$$LSC_x = \bar{X} + A_2 \bar{R} \quad (2.6)$$

$$LIC_x = \bar{X} - A_2 \bar{R} \quad (2.7)$$

Donde:

\bar{X} : La media de los valores medios de las muestras X

\bar{R} : Rango medio

A_2 : Constante que depende de la muestra (n)

El valor de la constante A_2 se obtiene de la tabla A1. Tabla de constantes para gráficos de control x, R (Anexo 1).

Para el gráfico de control R

1. Calcular los límites de control superior ($LSCR$) e inferior ($LICR$) $LSCR = D4 R$

Donde:

R : Rango medio

$D4$: Constante que depende del tamaño de la muestra (n).

$$LICR = D3 R \quad (2.8)$$

R : Rango medio

$D3$: Constante que depende del tamaño de la muestra (n).

El valor de $D3$ para tamaños de muestras menores o iguales a 6 es cero, eso implica que el límite de control inferior es cero, mientras que los valores de $D3$ y $D4$ se obtienen de la tabla A1. Tabla de constantes para gráficos de control x, R (Anexo 1).

Cálculo de la desviación estándar de los gráficos x, R . La estimación de la desviación estándar del proceso empleada para establecer los límites de control se

hace a partir de la variabilidad dentro de cada muestra. En consecuencia, la estimación de la desviación estándar refleja solo la variabilidad dentro de una muestra.

2.11.3 Gráfico de Levey-Jennings

Para la elaboración de este gráfico se llevan a cabo las siguientes operaciones,

1. Calcular la media de los valores puntuales de las muestras aplicando la ecuación 2.1
2. Calcular la desviación estándar (s) de los valores de las muestras aplicando la ecuación 2.4
3. Establecer los límites de decisión de acuerdo a la media con $\pm 1s$, $\pm 2s$ y $\pm 3s$

Variables a controlar

Es necesario identificar que variables del concentrado se van a medir para conseguir los resultados deseables, en este caso las principales variables a controlar son la concentración final de cada elemento en la identificación de la muestra. Esta definición se logra a partir del trabajo colegiado de diferentes departamentos de la empresa, en particular para este trabajo, la definición de dichas variables fue el resultado de un trabajo colegiado que se detalla en el siguiente capítulo, además de explicar la aplicación y los resultados que se arrojan en los diagramas de control.

CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DE UN MÉTODO ESTADÍSTICO PARA EL CONTROL DE LA CALIDAD Y LA MEJORA CONTINUA EN UNA INDUSTRIA MINERA

Como se mencionó en el primer apartado de este documento, la empresa donde se desarrolló este trabajo pertenece al sector minero, siendo sus principales productos: plomo, cobre y zinc. En el proceso de extracción, el porcentaje de metal extraído de una beta es el referente para determinar la estabilidad de dicho proceso. Como se señaló al inicio de este documento, es en el Laboratorio de Calidad en el Área de Ensaye por Vía Húmeda, empleando absorción atómica, como se determina este porcentaje, y es donde se presentó el problema que dio pauta a este trabajo. En los siguientes apartados se explicará con más detalle esto.

Antes de iniciar con la presentación del problema y las acciones que se llevaron a cabo para resolverlo, es importante explicar que en el sector minero el porcentaje de metales extraídos se conoce como *concentrado de metal* o *concentración del metal*, por tanto en el desarrollo de este documento, se podrán utilizar ambos términos en forma indistinta para señalar el porcentaje de metal extraído.

Como se mencionó en el resumen de este trabajo, en el primer semestre de 2012 se presentaron diferencias entre los porcentajes de metal extraídos contra los esperados. En primera instancia se recurrió a un laboratorio externo para corroborar los resultados obtenidos en el laboratorio de calidad de la propia empresa, sin embargo se obtuvieron diferencias entre los resultados proporcionados por el laboratorio externo y los reportados por el laboratorio de calidad de la propia empresa.

Después de un análisis de las posibles causas de los errores en las determinaciones de la empresa, se concluyó que la principal causa era falta de una técnica estadística adecuada que permitiera determinar la estabilidad del proceso y de la técnica de absorción atómica, y con ello obtener resultados confiables. Por la naturaleza de la

empresa se determinó que era posible estandarizar el proceso con la implementación de un Control Estadístico de Procesos.

Como punto de partida se estableció una metodología para la implementación del control estadístico, y se tomó como base el Ciclo de Deming adecuándolo al contexto de la empresa. A continuación se listan las etapas que se siguieron:

- 1- Definir claramente el problema e identificar sus causas,
- 2- Plantear acciones correctivas,
- 3- Análisis de causa raíz del problema real o potencial,
- 4- Definir un plan de acción para evitar recurrencia y/o ocurrencia,
- 5- Implementar acciones, revisión de eficacia de acciones,
- 6- Registro del seguimiento de las acciones tomadas,
- 7- Revisar efectividad y registrarlo
- 8- Cierre de las acciones tomadas.

Como antecedente para explicar cómo se abordó el problema, se dará una introducción sobre las actividades realizadas en el Laboratorio de Calidad de Planta Concentradora y su proceso de Ensaye por Vía Húmeda, información básica para el análisis y solución del problema.

3.1. Proceso de Ensaye por Vía Húmeda

Los **concentrados metálicos**, son el producto mineral que ha sido sometido a los procesos descritos en el Capítulo I (flotación, lixiviación, gravimetría, entre otros), para separar la mayor parte de la ganga de mineral y recuperar los contenidos valiosos.

Los concentrados llevan el nombre del metal con mayor contenido (lo que no quiere decir que sean productos metálicos), por lo que pueden ser concentrados de zinc, cobre, plomo y otros. Por ese motivo, es posible señalar que los concentrados contienen un metal en mayor proporción y está acompañado por otros elementos, además de materiales residuales, que también son considerados productos, por ello se

convierten en elementos pagables y/o penalizables, dependiendo de los requerimientos del comprador (o refinera) que procesara el concentrado.

Principales elementos de los concentrados de minerales con mayor valor comercial. La valorización de los productos minerales o metales constituye una parte esencial de cualquier estudio de viabilidad de un proyecto, porque son los ingresos previstos para el desarrollo del modelo de negocio. Los métodos para determinar el valor de un mineral o porcentaje de mineral, varían según su forma física y por la composición de los elementos metálicos complementarios al metal principal. Por lo general, los minerales son valorizados sobre la base de un peso, el cual puede referirse en *onzas* para los metales preciosos, *libras o kilogramos* para los metales valiosos o bien *toneladas métricas* para los metales menos valiosos, minerales en bruto y la mayoría de los minerales industriales. El precio del concentrado se establece sobre la base del metal contenido más que sobre el propio peso bruto en sí mismo. Para un determinado mineral, la transacción comercial puede darse en alguna o algunas de las diversas etapas de la producción del mismo. Por este motivo, el Laboratorio de Control de Calidad es el que ofrece los servicios que darán la naturaleza y especificaciones de los contenidos del concentrado. En consecuencia, se llevan a cabo las siguientes etapas para su valorización:

1. Pesaje, muestreo y determinación de humedad: Estos parámetros son reportados en un documento elaborado por la empresa y rubricado por ésta y el cliente. Se debe especificar el peso exacto, porcentaje o grado de humedad y los resultados del muestreo para los respectivos análisis. Esto permite determinar la calidad del producto (mantener un control permanente y optimizar los procesos), y con ello su valorización (mineral/ concentrado/ metal), para facilitar las transacciones comerciales. Tanto el pesaje, muestreo y determinación de humedad se llevan a cabo en la mina, en la planta concentradora, en la zona de embarque, y con base a las lecturas obtenidas es posible tomar decisiones para controlar la alimentación a la planta concentradora, para controlar la recuperación/calidad, para determinar las propiedades físicas y químicas, aspectos de seguridad y medio ambiente, manipuleo y transporte, además para valorizar los productos.

2. Ensayes o pruebas de laboratorio. Incluyen las diferentes pruebas de laboratorio y los procedimientos *dirimentes* o de separación de los concentrados. El método de ensaye para determinar el porcentaje de metal es por absorción atómica, técnica que se emplea para el análisis químico de elementos metálicos. Si existe diferencia entre el porcentaje de metal o en el porcentaje de humedad solicitados por el cliente, es decir que las diferencias exceden el límite de tolerancia o splitlimit (SL), se lleva a un proceso extra de separación, para eliminar el compuesto (s) o metal (es) que están presentes en un porcentaje superior al establecido. Posteriormente se lleva a cabo una nueva prueba o ensaye de la nueva mezcla y si el resultado obtenido excede nuevamente el límite de tolerancia, el costo será asumido por la empresa (vendedor).

Descripción del proceso y etapas del proceso

El proceso de valoración por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA) del concentrado metálico, se llevaba a cabo solo para el producto terminado, esto permite establecer varios parámetros los cuales describen la calidad del concentrado final, y dan información sobre el proceso de extracción.

En la siguiente figura se muestra el proceso de análisis por absorción atómica que se sigue en la empresa.

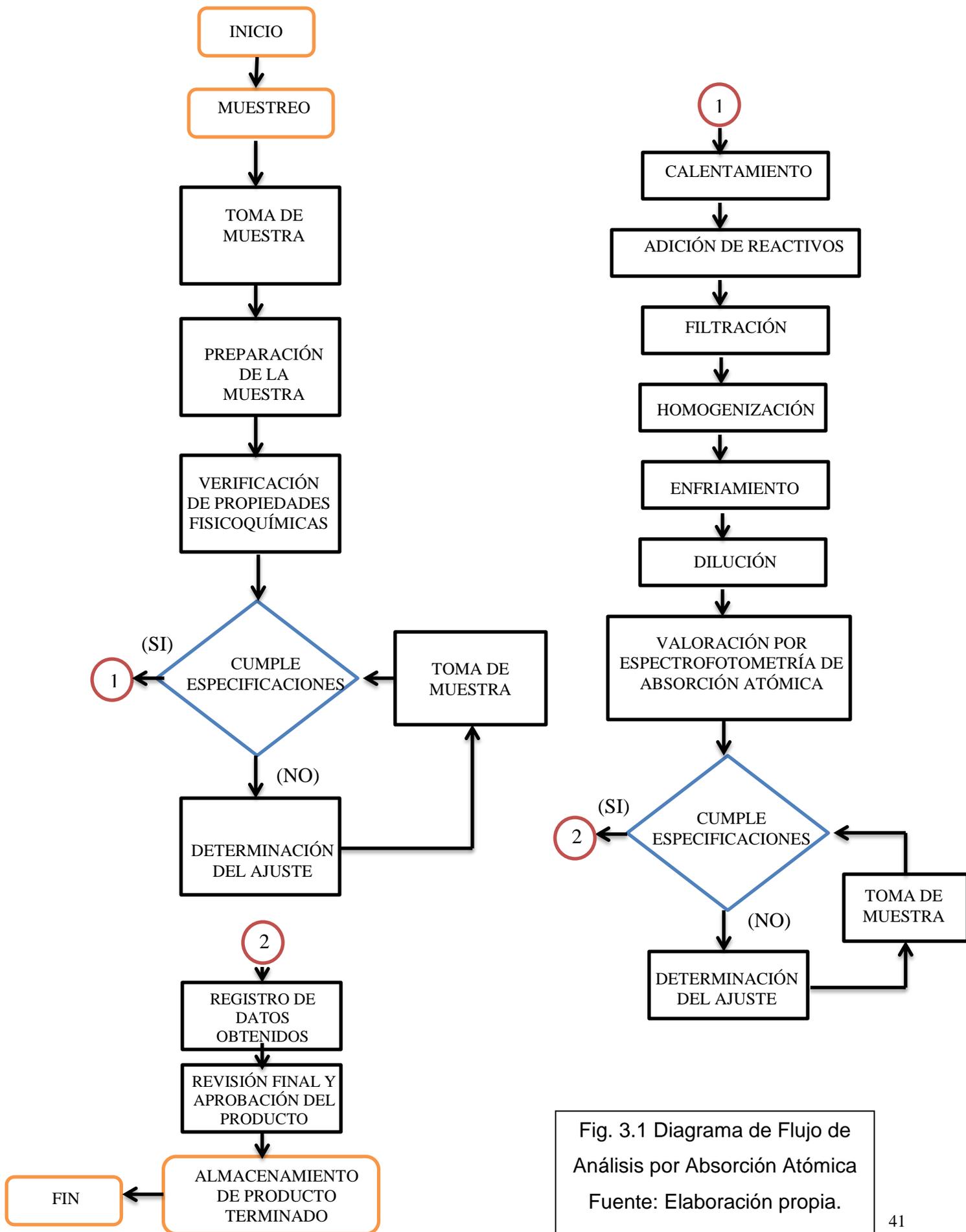


Fig. 3.1 Diagrama de Flujo de Análisis por Absorción Atómica
Fuente: Elaboración propia.

Como se observó en la Fig.3.1 el paso inicial del proceso de *ensaye por absorción atómica* comienza con un muestreo, es decir, se toma una muestra aleatoria de n unidades de cada lote para su apreciación.

El paso siguiente del proceso de ensaye es una de la más importante del proceso, esta es la preparación mecánica de la muestra. Se analizan muestras minerales de exploración, de proceso (alimentación y descarga a molinos, celdas de flotación y colas) y de producto final. Después de extraer la muestra de los respectivos puntos de muestreo de la producción, esta atraviesa una etapa de filtrado, secado y pulverizado con el fin de conseguir un tamaño de partícula uniforme, homogeneidad en el color y un porcentaje mínimo de humedad de la muestra a examinar.

Posteriormente, la muestra es llevada al área de balanzas en donde de acuerdo al tipo de muestra (cabeza, cola, concentrado final, otra), es tomada una porción de la misma para ser llevada a una verificación de sus propiedades fisicoquímicas, en la cual si la muestra no cumple con las características deseadas (color, humedad y tamaño de partícula), son reelaboradas en el área de preparación de muestra para repetir su análisis. Por tanto, un incumplimiento en sus características implicaría un nuevo muestreo y un análisis completo de los puntos de proceso involucrados en la línea de producción.

Para la determinación de humedad de la muestra, se realiza la prueba por un método gravimétrico; es decir, que la determinación de la masa del agua se efectúa por la diferencia en peso entre la masa de la muestra sólida húmeda y la masa de la muestra sólida seca. Se considera como muestra sólida seca aquella que ha sido colocada en la estufa a 105°C hasta obtener peso constante.

Cuando las propiedades de la muestra han sido verificadas exitosamente, el área siguiente para el análisis es mediante una vía húmeda, donde se prepara la muestra para poder detectarla en el espectrofotómetro de absorción atómica.

Las muestras son depositadas en un vaso de precipitado, el cual es colocado en una parrilla a una temperatura promedio de 150°C, al cual se le adiciona una solución de ácido clorhídrico y ácido nítrico para posteriormente ser llevado a calentamiento, hasta que la solución llegue a ebullición. Consecutivamente, las soluciones obtenidas son filtradas para determinar la materia insoluble. Al finalizar la filtración, la solución que se obtiene es depositada en un matraz volumétrico, mientras que el papel filtro es calcinado en una cápsula de arcilla para determinar la cantidad de materia insoluble.

Del matraz previamente aforado es tomado un volumen pequeño de muestra y se afora en otro matraz que contiene una cantidad igual de ácido clorhídrico.

Por último, las soluciones son llevadas al espectrofotómetro de absorción atómica para poder obtener el porcentaje de metal presente en cada muestra. En esta etapa final, las muestras son sometidas por segunda vez a una valorización de sus características para poder así verificar que estas cumplan con especificaciones, en este caso, se revisa que el porcentaje de metal principal (que integra la muestra en una mayor proporción) tenga un valor similar al de un estándar del tipo de muestra que representa. Por tanto, si no se obtiene un valor similar, se llevan a cabo acciones para corregir el fuera de especificación, como son: la re calibración del equipo de absorción atómica, construcción nueva de curvas de calibración y preparación de material de referencia utilizado para la comparación. No obstante, es una etapa crítica dentro del proceso general de la empresa dado que el resultado arrojado por el equipo de absorción atómica implica el porcentaje de metal contenido en el producto final. Incluso, si se realizan dos análisis de una misma beta y los valores no corresponde a los esperados, es posible que se realicen ajustes al proceso mismo de extracción, por ello la importancia de la exactitud del método para determinar el porcentaje de metales por absorción atómica.

A partir de esta breve explicación, sobre el concepto de concentrados metálicos, del proceso de extracción y de las técnicas de laboratorio que se lleva a cabo en la

empresa, se da inicio a la explicación de la implementación del control estadístico de proceso, para atender a la problemática que a continuación se analiza.

3.2 Definición del problema

Concebir la idea a investigar

Este trabajo es el resultado de la necesidad de resolver los problemas en la variabilidad del proceso de extracción. Por la naturaleza del proceso, la variabilidad de este se observaba al determinar el porcentaje del metal en Laboratorio del Calidad, por medio del análisis por absorción atómica. Como se ha mencionado en este documento, en el primer semestre de 2012 se presentaron diferencias en los resultados esperados en el porcentaje de metal, lo que señalaba problemas en el proceso o en la técnica de análisis.

Como primera acción se recurrió a un laboratorio externo para el análisis de 15 muestras. Si los resultados del laboratorio externo eran congruentes con los esperados, sería un indicativo de que el problema estaba en el desarrollo del análisis por absorción atómica. Si los resultados reportados por el laboratorio externo eran congruentes con los reportados por el laboratorio de la empresa, esto podría indicar problemas en alguna etapa de extracción de los metales o en la técnica de absorción atómica. Los resultados del laboratorio externo tuvieron una diferencia de $\pm 1.5\%$, en 8 de 15 muestras, respecto a las 7 muestras restantes, la diferencia fue mayor al 5% lo que permitió concluir que era importante revisar tanto procedimientos del proceso de extracción como el desarrollo del análisis por absorción atómica.

Situación a analizar

La identificación de la situación a analizar fue una tarea que se realizó mediante reuniones de las áreas de producción y calidad; las ideas arrojadas al cuestionar el *¿Por qué la diferencia entre los resultados del análisis?*, fueron las siguientes:

- Propiedades fisicoquímicas de la muestra
- Desviaciones en el procedimiento
- Contaminación externa en el intercambio de laboratorio

- Adición de reactivos
- Calibración y limpieza de equipo
- Experiencia del analista
- Interferencias en el ambiente durante el análisis
- Diferencias en alguna de las etapas del proceso de extracción
- Falta de estandarización para llevar a cabo las operaciones en la extracción del concentrado

Como se muestra en la Figura 3.1, la técnica de absorción atómica consta de varias etapas y el inadecuado control en cualquiera de las mismas evitaría cumplir con el propósito esencial del laboratorio, *obtener resultados de alta calidad y confiabilidad*. El hecho de que la técnica de absorción atómica se llevara a cabo en forma incorrecta impactaba en varios aspectos: la retención del producto; la entrega a destiempo del metal o de las menas a los clientes; un ajuste no necesario al producto; y ajustes a las operaciones de extracción. En particular, la calidad de los resultados del Laboratorio de Calidad está directamente relacionada con el buen funcionamiento de los equipos, a la competencia de cada operario y el cumplimiento de los procedimientos de ensayo.

Para discernir cuales de las posibles causas antes listadas, eran las que incidían en porcentajes de metal erróneos, se realizó un mapeo al proceso de extracción y un monitoreo del proceso de valoración del concentrado por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA).

3.3 Causas del problema

A partir del problema: *diferencia entre los resultados de los ensayos entre dos laboratorios al analizar la misma muestra*, fue necesario identificar las causas de éste. Para ello se involucró a los principales departamentos responsables del producto: producción y calidad. Las sesiones de trabajo fueron coordinadas por el departamento de producción y como resultado de la lluvia de ideas se determinó que era necesario llevar a cabo un mapeo de procesos del proceso completo de extracción y, se construyó un diagrama de causa-efecto (ver Figura 3.2), el cual permitió identificar las

posibles causas y los efectos de un incorrecto análisis por absorción atómica, considerando las etapas mostradas en la Figura 3.1.

Como resultado del mapeo de procesos del proceso de extracción, se pudo concluir que no se existen diferencias significativas en la realización de cada operación, por lo que se concluyó que el problema principal se tenía en el laboratorio de calidad. Se determinó que las operaciones de extracción, tamizado y lixiviación, se llevaban de acuerdo a lo establecido en los manuales de operación, no así la operación de flotación debido a que la composición de los minerales constantemente varía de acuerdo a las condiciones que el subsuelo vaya presentando, ocasionando así mismo que si se esta se encuentra baja se debe aumentar la cama de espuma para que el mineral salga más concentrado y si se encuentra alta se debe reducir la cama de espuma para que los derrames fluyan y de esta manera sea aprovechado de una mejor forma, lo que provoca a su vez cambios en la adición de reactivos (colectores, espumantes, etc.), y los tiempos de agitación dentro de las celdas de flotación. No obstante no se requirió llevar a cabo acciones correctivas, dicho suceso se explicara de manera más amplia en las estrategias para solucionar el problema en apartados posteriores.

En segundo término, para determinar si el análisis por absorción atómica se llevaba adecuadamente, se supervisó el desarrollo del análisis de 25 muestras, y se detectó que no se contaba con un método sistemático, que permitiera detectar desviaciones en el proceso de extracción, tampoco se tenían elementos para mostrar la tendencia de los resultados obtenidos. En la siguiente figura se muestra el diagrama causa – efecto del *proceso de absorción atómica*, como se identifican al conjunto de pasos que se mostraron en la Figura 3.1.

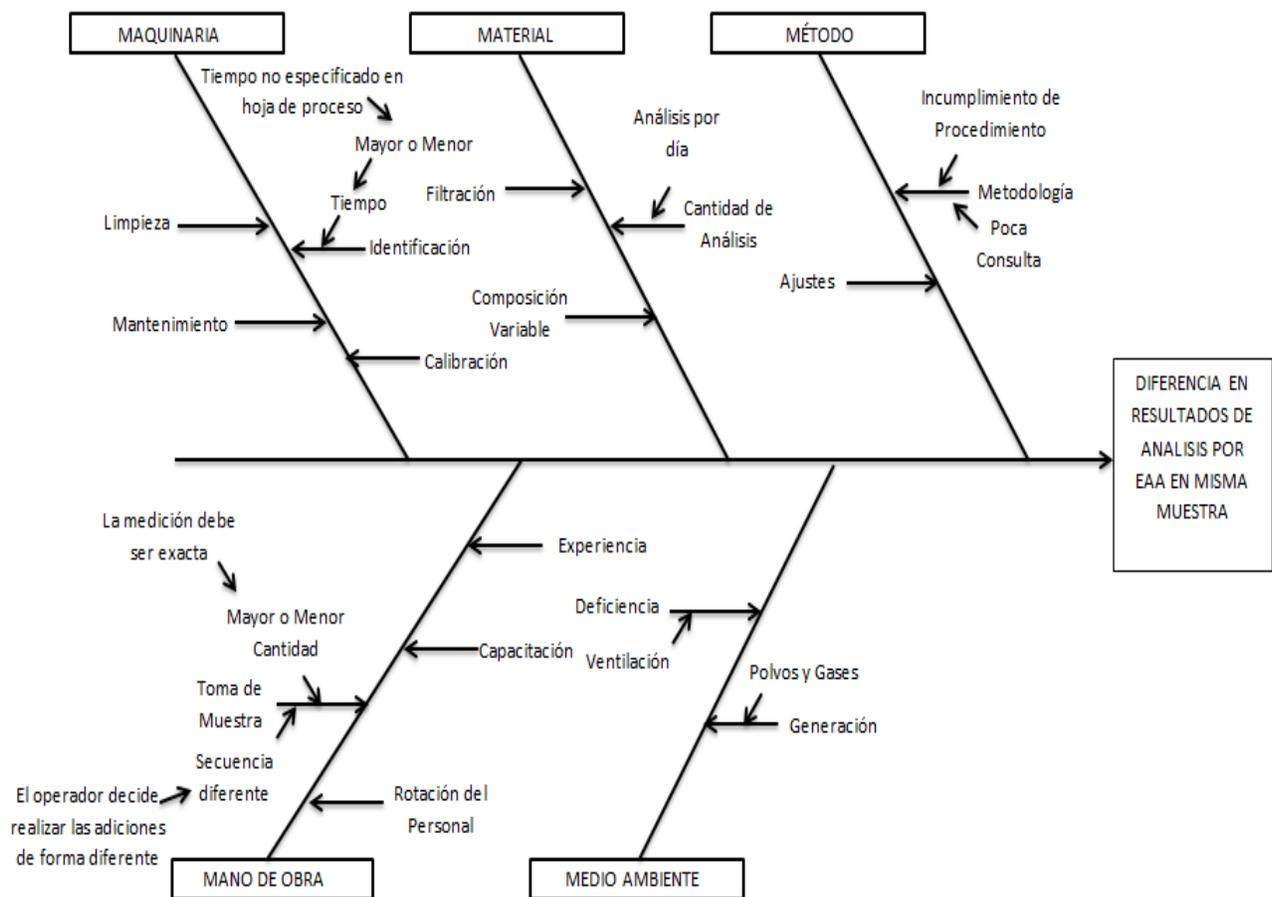


Fig.3.2 Diagrama causa-efecto

Fuente: Elaboración propia en base a información recopilada de posibles causas del problema en el Laboratorio

Se concluyó que el proceso de absorción atómica no estaba estandarizado y era necesario desarrollar un sistema para el seguimiento de la validez de los ensayos, ya que como se mencionó, los resultados de estos análisis son el referente para hacer cambios en una o varias de las etapas de extracción.

3.4 Análisis de las causas del problema a resolver

En base al diagrama causa-efecto fue posible realizar una clasificación de dichas causas de acuerdo a la gravedad, probabilidad y tipo de causa, y jerarquizar el orden

de solución en base a su gravedad y probabilidad de ocurrencia. Esto se muestra en la siguiente tabla.

Cuadro 1.4 Matriz de análisis de causas

	Posibles Causas	Tipo	Gravedad	Probabilidad	Acciones para atender las causas
1	Variabilidad en composición de la muestra	Material	Alta	Alta	Supervisión adecuada por parte del departamento de producción y laboratorio en trayectoria de la muestra
2	Equipos de medición descalibrados	Maquinaria	Alta	Media	Dar seguimiento al programa de calibración y verificación de equipos, con la finalidad de contar con equipos de medición confiables
3	Generación de gases y polvos durante el proceso de ensaye (contaminación de muestra)	Medio Ambiente	Baja	Media	Definir prioridades de atención de las exposiciones de la muestra y capacitación del personal.
4	El operador decide realizar la toma de muestra de forma diferente	Mano de Obra	Media	Media	Supervisión adecuada por parte del departamento de laboratorio. Establecer prioridades de atención en el cumplimiento de procedimiento
5	Tiempo de identificación en el equipo no especificado en procedimiento	Método	Media	Baja	Corrección de hojas técnicas. Capacitación general de los operadores en equipos.
6	Gran cantidad de muestras a analizar por día	Material	Baja	Media	Definir prioridades de atención de las muestras.
7	Incumplimiento en metodología por poca consulta	Método	Media	Baja	Supervisión adecuada por parte del departamento de laboratorio. Establecer prioridades de atención en el cumplimiento de procedimiento
8	Fallas en etapa de filtración: <ul style="list-style-type: none"> • Rotura del filtro • Colocación incorrecta del filtro 	Material	Alta	Media	Verificar las condiciones del filtro antes de colocarlo, asegurarse que sea el filtro adecuado. Capacitación del personal en la colocación correcta del filtro.
9	Rotación de analistas en prueba de identificación con equipo de EAA	Mano de Obra	Media	Alta	Supervisión adecuada por parte del departamento de laboratorio para la organización del personal y seleccionar apropiadamente a los analistas encargados de identificación.
10	Competencia del personal técnico nuevo y antiguo	Mano de Obra	Alta	Media	Establecer la programación y realización de mediciones para determinar la repetibilidad y reproducibilidad en los casos que sea posible.

Fuente: Elaboración propia en base a información recopilada en Laboratorio

Con el diagrama de Ishikawa terminado, el paso siguiente fue analizar cuáles de estas causas eran las más perjudiciales, es decir, las que repercuten en un mayor número de análisis y por tanto en mayores pérdidas de recursos. Para definir las se elaboró una matriz de ponderación, en esta se incluye la gravedad de que suceda alguna de las causas, así como la probabilidad con la que estas pueden ocurrir. La gravedad que se establece es un valor arbitrario asignado con base a la experiencia del personal involucrado en el proceso. Las causas con el valor más alto serán aquellas que deben atenderse con mayor prontitud.

Tabla 1.1 Valores para Gravedad y Probabilidad de las posibles causas

Gravedad		Probabilidad	
Alta	10	Alta	3/6
Media	5	Media	2/6
Baja	2	Baja	1/6

Fuente: Elaboración propia

Tomando como base los valores de la Tabla 1.1 se elaboró una matriz de ponderación multiplicando la gravedad atribuida a cada causa por la probabilidad con la que sucede. Como resultado de esto se obtuvo matriz de la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Matriz de ponderación para probabilidad y gravedad

Probabilidad	Gravedad		
	Baja	Media	Alta
Alta	Medio (6/6)	Alto (15/6)	Inaceptable (30/6)
Media	Bajo (4/6)	Medio (10/6)	Alto (20/6)
Baja	Aceptable (2/6)	Bajo (5/6)	Medio (10/6)

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Tabla 1.2, los datos que presentan una gravedad Alta o Inaceptable son los que se deben atender de inmediato pues generan mayor pérdida para la empresa.

Con base en el diagrama de causa-efecto y a la ponderación establecida para cada causa de acuerdo con su gravedad, se elaboró una matriz de ponderación para las posibles causas de ajuste encontradas, esto puede apreciarse en la Tabla 1.3. La información de esta tabla permitió establecer cuáles son las causas que debían atenderse primero. Como se ve, aquellas con mayores ocurrencias y gravedad en el proceso pertenecen a Material y enseguida a Mano de Obra. Por tal motivo, es necesario buscar una solución para disminuir la incidencia de estas

Tabla 1.3 Ponderación para las posibles causas de ajuste de producto

Causa	Gravedad	Probabilidad	Total
Materiales			
Variabilidad en composición de la muestra	10	3/6	30/6
Gran cantidad de muestras a analizar por día	2	2/6	4/6
Fallas en etapa de filtración: <ul style="list-style-type: none"> • Rotura del filtro • Colocación incorrecta del filtro 	10	2/6	20/6
Maquinaria			
Equipo de medición descalibrado	10	2/6	20/6
Mano de Obra			
El operador decide realizar la toma de muestra de forma diferente	5	2/6	10/6
Rotación de analistas en prueba de identificación con equipo de EAA	5	3/6	15/6
Competencia del personal técnico nuevo y antiguo	10	2/6	20/6
Método			
Tiempo de identificación en el equipo no especificado en procedimiento	5	1/6	5/6
Incumplimiento en metodología por poca consulta	5	1/6	5/6
Medio Ambiente			
Generación de gases y polvos durante el proceso de ensaye (Contaminación de muestra)	2	2/6	4/6

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al análisis hecho de la situación, se determinó que la etapa de toma de muestra y valoración en el equipo para absorción atómica son los aspectos críticos del proceso. El primero incide directamente en el valor del porcentaje del producto intermedio y el valor final de las propiedades finales del producto.

En el Cuadro 1.5 se muestra un resumen de las causas que resultaron con mayor ponderación. El análisis de estas causas se presenta en el apartado siguiente.

Cuadro 1.5. Causas a atender en primera instancia

Causas con mayor gravedad y mayor probabilidad en el Laboratorio de Calidad	
<ul style="list-style-type: none"> • Variabilidad en Composición de la muestra. • Fallas en etapa de Filtración • Equipo de medición descalibrado 	<ul style="list-style-type: none"> • Competencia del personal técnico nuevo y antiguo • Rotación de analistas en prueba de identificación con equipo de EAA

Fuente: Elaboración propia

Análisis de las Causas

Variabilidad en Composición de la Muestra: La variabilidad en la composición química de los concentrados tiende a ser muy distinta de una muestra a otra, y se determinó que el manual de procedimiento de la técnica por absorción atómica no considera esto, ya que el contenido del yacimiento no es homogéneo y por consiguiente los valores resultantes son distintos. Por otra parte, el laboratorio no cuenta con datos de referencia de las muestras a analizar lo que provoca que no es posible saber cuándo un resultado está fuera de especificación, esto causando a su vez que no exista la manera de ajustarlo, lo que ocasiona un reproceso teniendo lo que es un problema incorregible. Esto además de generar errores en las especificaciones

del producto, ocasionaba un ajuste en el lote producido y/o en alguna de las etapas de extracción.

Fallas en etapa de filtración: Se determinó que no se contaba con una capacitación e instrucciones para verificar las condiciones del filtro y su colocación, es decir no se tenía una técnica estandarizada para la colocación e inspección del filtro por parte del personal involucrado y esto a su vez originaba rupturas en el material o la utilización errónea de otro modelo de filtro, el cual que ocasionaba contaminaciones en la muestra.

Equipo de medición descalibrado: La calidad de los resultados está directamente relacionada con el buen funcionamiento de los equipos, por ello, es necesario realizar las calibraciones, mantenimientos y verificaciones, con el fin de garantizar que todos los equipos usados cumplen con los requisitos exigidos para el trabajo en los laboratorios. En el laboratorio se tenía documentado e implementado un procedimiento de aseguramiento metrológico, instructivos para el control y verificación de las magnitudes de medición críticas, un plan anual de verificación, mantenimiento y calibración, y formatos para registrar los mantenimientos, calibraciones y verificaciones realizadas a los equipos y patrones. Sin embargo, al verificar bitácoras de seguimiento al mantenimiento de los equipos de medición se detectó que no se realizaban con la frecuencia establecida. Se consideró que una de las posibles causas para la falta de mantenimiento de dichos equipos es la falta de capacitación de los operadores que deben de llevar a cabo dicha actividad, así como una falta de revisión y seguimiento a las bitácoras de mantenimiento de dicho sistema.

Competencia del personal técnico nuevo y antiguo: Se revisó el expediente de cada uno de los técnicos que realizaban el análisis por absorción atómica y se detectó que el 75% de ellos no contaban con capacitación para manejar el equipo de Espectroscopía por Absorción Atómica (EAA). Esto generaba incertidumbre acerca de si la forma en que alguno de los operadores llevaba a cabo un análisis es lo que estaba provocando los problemas de ajuste.

Rotación de analistas en prueba de identificación con equipo de EAA: Esta causa es consecuencia de la falta de capacitación en la mayoría de los técnicos ya que como se explicó en el párrafo anterior, el 75% de ellos no cuenta con conocimiento en el manejo del equipo de EAA, provocando así que el trabajo dentro del área deba organizarse de tal manera que únicamente las personas capacitadas realicen este procedimiento. Además de establecer un programa de capacitación para todo el personal operativo.

Debido a lo anterior y a que el mayor número de causas –y entre ellas algunas de las más graves– fueron referentes al material, se propuso una posible solución enfocada al método de análisis, dicha solución fue **Implementar un Control Estadístico del Proceso**. Con esto y para que los operadores realicen la operación adecuada y ordenadamente, ya que es importante contar con algún método sistemático que permita detectar desviaciones del proceso o del método y si es posible antes de que ocurran.

Gráficos de control de lotes producidos antes de la implementación del Control Estadístico del Proceso

Para terminar el análisis de las causas y sus efectos, se decidió analizar datos de 25 muestras, como se había mencionado antes. Con dichos datos se elaboró un gráfico de Levey-Jennings, considerando que la variable es cuantificable (porcentaje de metal), y que se tiene como referencia el valor de porcentaje de metal establecido en los estándares de calidad y que son de fácil interpretación.

Se elaboró un gráfico por cada metal y en cada uno se graficó tiempo contra el índice de desviación estándar, tomando como valor crítico ± 3 desviaciones estándar.

Se consideró analizar el porcentaje de metal determinado por el método de EAA, de los meses de marzo y abril, para los distintos lotes de los diferentes concentrados producidos en la empresa (plomo, cobre y zinc).

Para la construcción de dichos gráficos de control se llevaron a cabo los siguientes pasos:

1. Selección de la característica que se va a controlar: Porcentaje de metal determinado por el método de absorción atómica, ya que sirve como medio para verificar que el proceso se encuentra en una situación controlada.
2. Selección de un número conveniente de muestras del producto y toma de los datos de la medición de la característica de la calidad elegida: Dado que la producción es continua, se llevó a cabo un solo muestreo por día, las 25 muestras necesarias fueron tomadas por un solo operador y se registraron de acuerdo como se fueron obteniendo. Esta decisión fue a fin de poder equilibrar algunos factores como los costos, posible deslizamiento en el ajuste de los equipos, disponibilidad de operadores y accesibilidad del equipo de mediciones.
3. Cálculo de promedio y desviación estándar: Aplicando las fórmulas descritas en el Capítulo 2, se obtuvieron los valores. Se traza los valores del promedio como una línea central en el gráfico de control.
4. Cálculo de los límites de control: Las fórmulas empleadas para el cálculo de los límites de control se describen en el Capítulo 2, estableciéndolos de acuerdo a la media con $\pm 1s$, $\pm 2s$ y $\pm 3s$. Estos límites de control se trazan por medio de líneas con respectivos colores para su fácil identificación.

En las siguientes tablas (1.4, 1.5 y 1.6) se muestran los valores obtenidos para la elaboración de gráficos de control de porcentaje de las muestras y su análisis (método del diagrama de control de Levey - Jennings), como ya se mencionó con el fin de observar el comportamiento del proceso, antes de que se realizara alguna modificación.

Tabla 1.4 Datos correspondientes a 25 lotes de concentrado de plomo producidos en los meses de marzo y abril de 2012

No. Muestra	Porcentaje de Plomo (%)
1	27.03
2	22.39
3	23.48
4	22.63
5	25.43
6	22.42
7	22.76
8	17.22
9	22.12
10	22.52
11	23.11
12	27.84
13	22.17
14	22.01
15	19.05
16	23.14
17	17.42
18	23.11
19	23.01
20	22.96
21	28.33
22	23.87
23	19.01
24	22.32
25	23.65
Media	22.76
Desviación Estándar	2.69

Fuente: Datos emitidos por el Laboratorio

A partir de los valores calculados se determinaron los límites para el gráfico de control de Levey-Jennings, esto se muestra en la Figura 3.3.

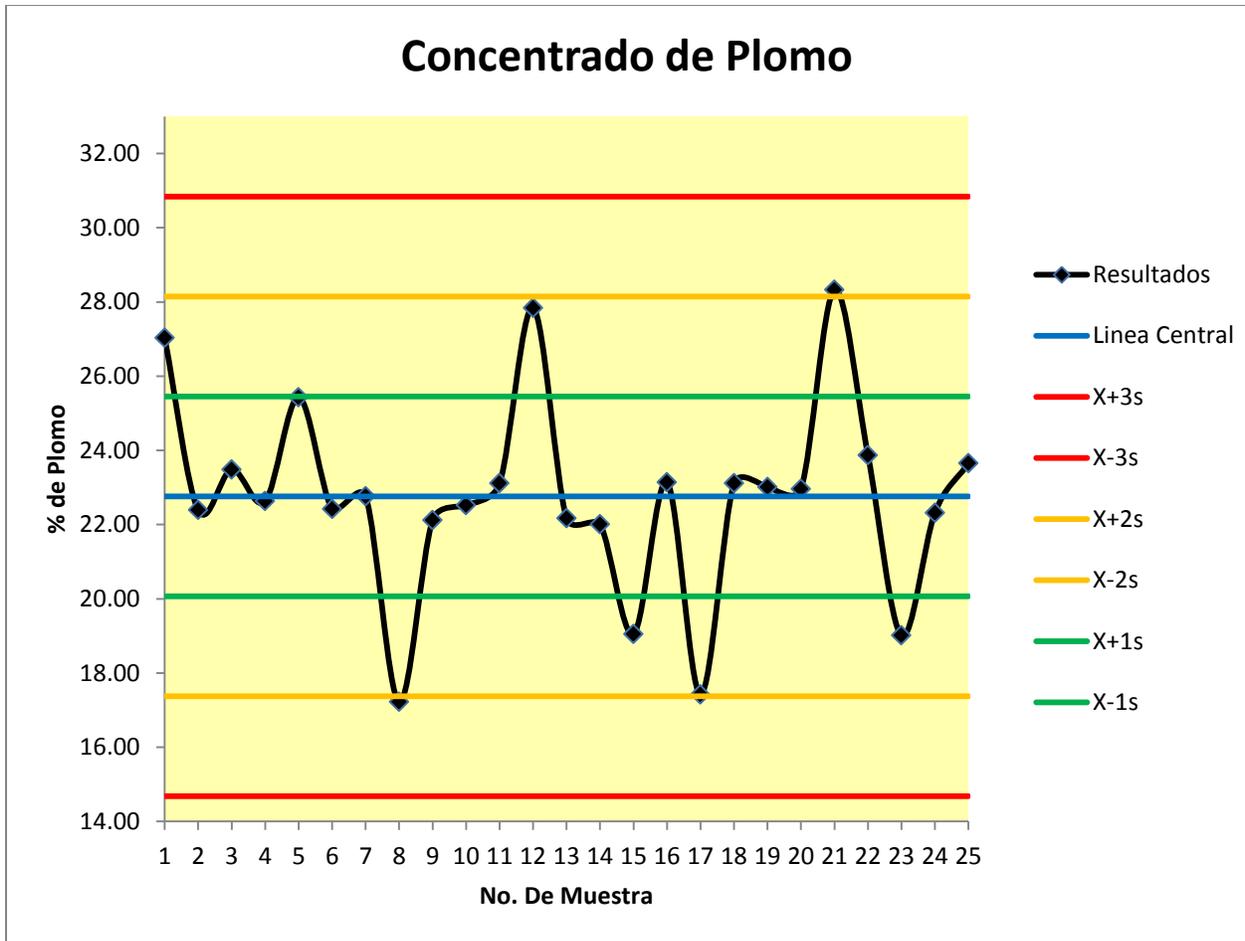


Fig.3.3 Gráfico de control de Levey- Jennings Plomo

Fuente: Elaboración en base a datos emitidos por el Laboratorio

Como se observa en la gráfica anterior, los resultados de la composición son variables respecto a cada lote. Es importante resaltar que para la comercialización de concentrados minerales, es un requisito por norma, que los resultados se encuentren en $\pm 2s$. Sin embargo, dentro del laboratorio se estableció como una norma de calidad interna que los puntos cercanos a estos límites se consideraran fuera de límite de control, es decir se considera fuera de control al sobrepasar el $\pm 1s$, esto al ser aplicadas las políticas de mejora continua en este departamento. Por tanto, de acuerdo al gráfico de control antes expuesto, es posible concluir que el proceso se encuentra fuera de control ya que existen suficientes puntos fuera de los límites que marca la especificación.

Se puede asociar la diferencia en los porcentajes a las causas expuestas en el apartado anterior. A continuación se muestran la tabla y el gráfico de control elaborado para los concentrados de zinc, el cual también es producto final de la empresa.

Tabla 1.5 Datos correspondientes a 25 lotes de concentrado de zinc producidos en los meses de marzo y abril de 2012

No. Muestra	Porcentaje de Zinc (%)
1	48.31
2	51.35
3	50.55
4	49.34
5	51.56
6	54.36
7	48.49
8	50.19
9	51.10
10	52.14
11	49.92
12	51.19
13	50.84
14	51.98
15	47.55
16	53.25
17	50.50
18	51.12
19	47.29
20	53.54
21	52.63
22	51.23
23	54.23
24	49.27
25	51.20
Media	50.58
Desviación Estándar	1.83

Fuente: Datos emitidos por el Laboratorio

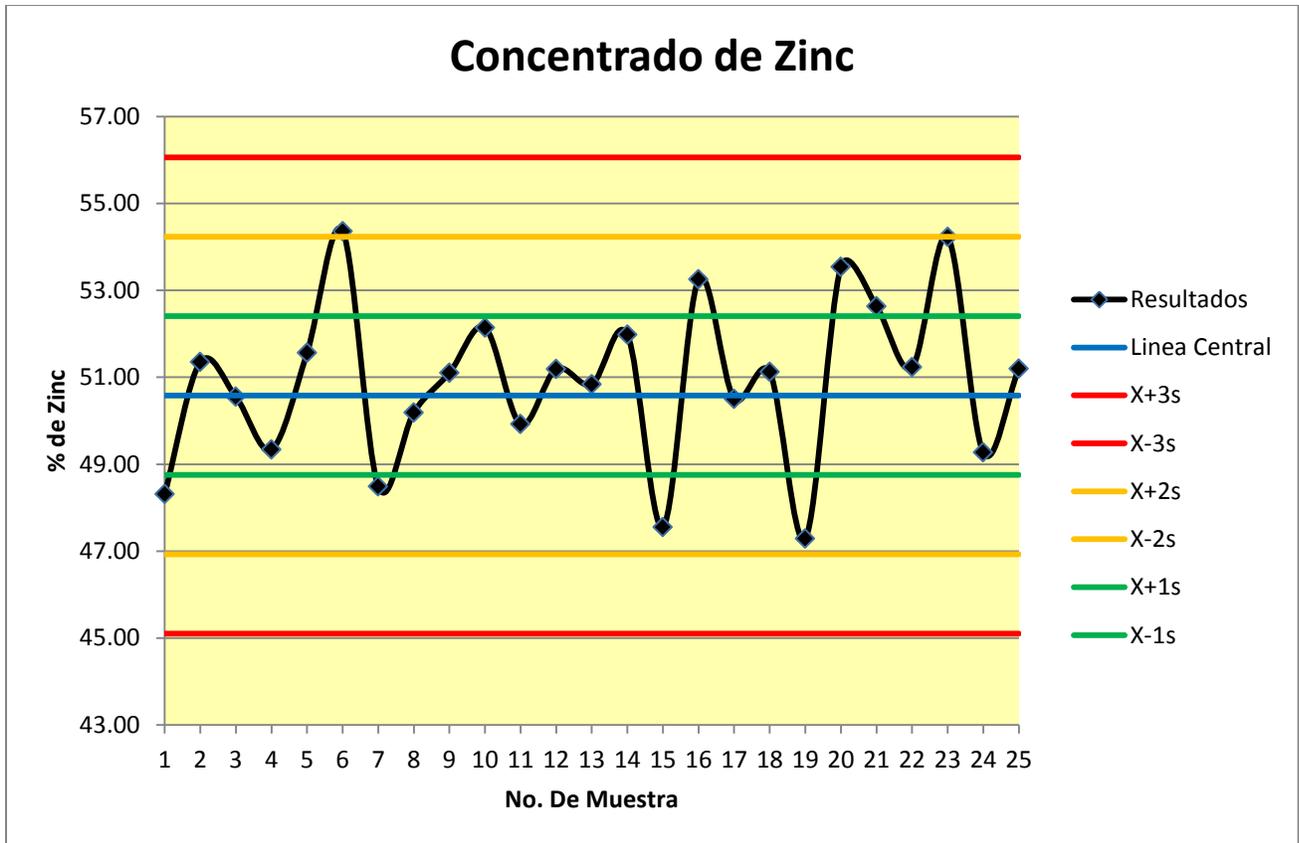


Fig.3.4 Gráfico de control de Levey- Jennings Zinc

Fuente: Elaboración en base a datos emitidos por el Laboratorio

Como se observa en la gráfica, existe variabilidad en los porcentajes de los concentrados de zinc. En este caso en particular, el zinc es el producto final que se encuentra en mayor cantidad en los yacimientos de la empresa, el porcentaje de metal no puede ser menor al 50%, por lo que es posible apreciar en la tabla que existen puntos por debajo de este porcentaje indicando pérdidas importantes para la comercialización de los productos.

Respecto a los concentrados de cobre, en la siguiente tabla se muestran los porcentajes obtenidos en los 25 lotes analizados.

Tabla 1.6 Datos correspondientes a 25 lotes de concentrado de cobre producidos en los meses de marzo y abril de 2012

No. Muestra	Porcentaje de Cobre (%)
1	23.39
2	22.90
3	23.09
4	27.02
5	27.68
6	31.14
7	27.01
8	26.11
9	23.45
10	26.92
11	27.29
12	26.57
13	22.31
14	27.14
15	26.11
16	27.65
17	26.97
18	26.97
19	24.35
20	26.63
21	31.11
22	27.92
23	29.96
24	22.43
25	27.15
Media	26.51
Desviación Estándar	2.41

Fuente: Datos emitidos por el Laboratorio

La gráfica inicial de control estadístico de proceso para este metal se muestra en seguida.

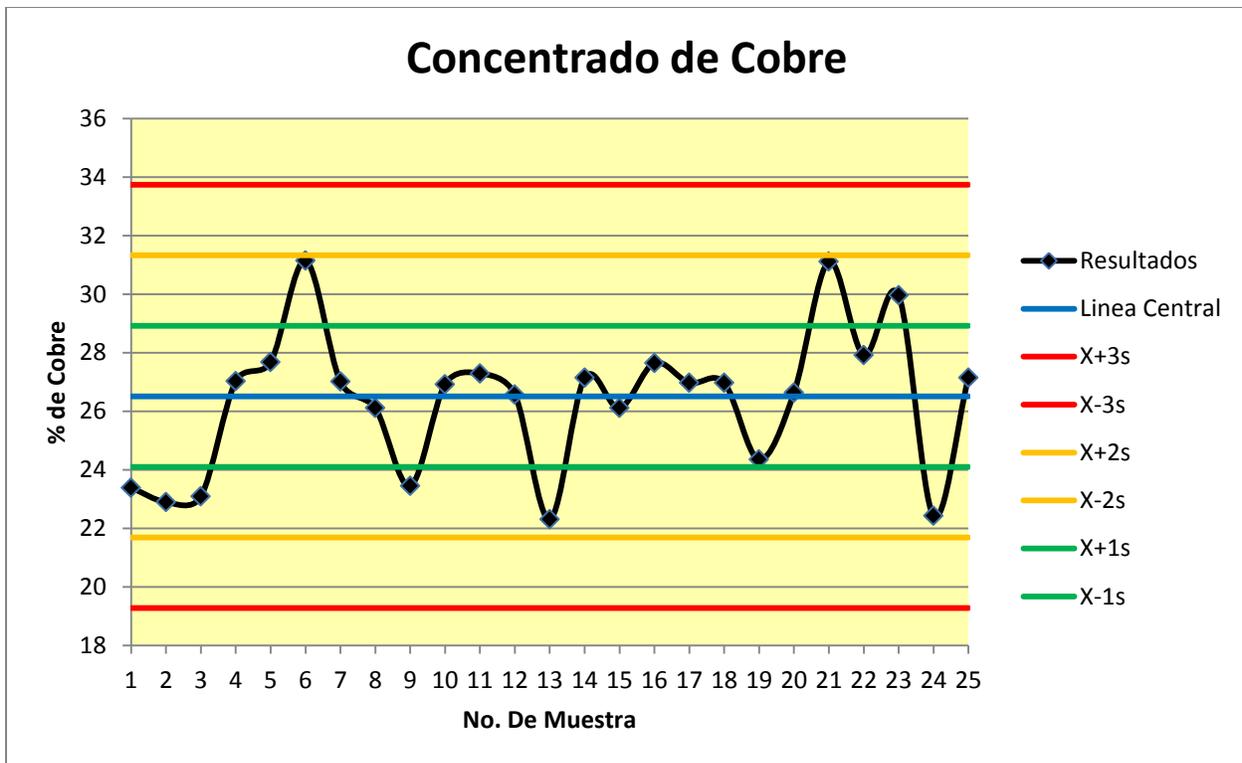


Fig.3.5 Gráfico de control de Levey- Jennings Cobre

Fuente: Elaboración en base a datos emitidos por el Laboratorio

Finalmente es posible observar en la gráfica para el concentrado de cobre una similitud con el gráfico antes expuesto para plomo, ya que los resultados de la composición son más variables respecto a cada lote en comparación con los gráficos de concentrado de zinc, lo que indica igual que en con los otros metales, que hay una variabilidad en los porcentajes reportados.

En resumen, es posible establecer que es necesario que dentro de las áreas de extracción y de producción se lleve a cabo una supervisión constante en la materia prima y en los procesos de separación de ambas líneas de producción (cobre y plomo), ya que el valor del porcentaje de metal arrojado por el método de absorción atómica depende de la composición inicial que se tenga en los yacimientos hasta su concentración en planta. Al analizar los resultados con el departamento de producción y como resultado del mapeo del proceso se determinó que existe una inadecuada evaluación de la materia prima lo que con lleva a una inadecuada separación y

purificación del metal. Por tanto, se concluyó que es necesario llevar a cabo acciones correctivas para las etapas en la que se ven más afectadas las propiedades de los productos como es flotación. Sin embargo si no se llevan a cabo acciones para corregir los problemas en el proceso (inadecuado control de la alimentación de molinos, agregado de reactivos en el área de flotación y agitación durante el proceso), los problemas con la variabilidad no se resolverían. Cabe resaltar que el problema de una incorrecta medición de la composición podía incluso ocasionar el rechazo de un lote dentro de especificaciones o por el contrario la aceptación de un lote fuera de especificaciones, por ello es importante resolver también los problemas en el proceso completo para determinar el porcentaje de metal por EAA.

3.5 Estrategias para la solución del problema: Plan de Acción

A continuación se muestran las estrategias utilizadas para la solución de los principales problemas durante el proceso de análisis de porcentaje de metales por absorción atómica en el Laboratorio de Calidad de la Minera Tizapa y de las acciones planteadas para los problemas en el departamento de producción.

Como se identificó en los gráficos de control, en general el porcentaje de dispersión en promedio es mayor al 20% (14 lotes de 25). Como primera estrategia se decidió establecer límites de control de proceso con un rango menor, esto permitiría asegurar la calidad del producto, al ser más restrictivos los límites de control. Efectivamente, con esta consideración se obtendría que los operadores dentro del laboratorio se exigieran un extra en su labor diaria llevando a cabo un proceso de mejora continua considerando que el operario al ser exigido fuese capaz de descubrir sus fortalezas y debilidades del mismo modo que identificaba su grado de conocimiento y compromiso con el control de calidad del producto al verificar el estado de los procedimientos analíticos, equipos e instalaciones físicas que se tienen disponibles.

De tal forma que las gráficas fueran colocadas a la vista en el laboratorio y lo más cercano posible a las estaciones de proceso (los resultados del porcentaje de metal se

registraran día con día). Permittedose así que aquellos lotes que presentaran resultados fuera de los límites, se investigaran de inmediato.

Para lograr una menor dispersión en los valores del porcentaje de metales, fue necesario establecer un programa permanente de supervisión de cada una de las etapas del proceso de extracción, sobre todo de adición de químicos en la etapa de flotación, con ello se evitarán posibles dispersiones. Al llevar a cabo una revisión más estricta de las etapas críticas del proceso de extracción con el departamento de producción al mismo tiempo que en el laboratorio se vigilaba que solo el personal capacitado llevara a cabo el análisis de absorción atómica, de forma inmediata se observó una menor variabilidad en el proceso, y con ello el porcentaje de metal manifestó una desviación menor, lo cual se describe en el siguiente capítulo.

Consecuentemente, la acción de evaluar de una manera más estricta a ambos departamentos se realizó también con el objetivo de conservar en la empresa un proceso de mejora continua, lo cual implica que todas las estructuras de la empresa deban mantener labores de mantenimiento e innovación con el fin de obtener un progreso y mejor desempeño por parte del operario sin necesidad de grandes inversiones. Para esto, se estableció en los manuales de operación las revisiones directivas con base en un seguimiento específico en cada proceso en cada uno de los casos (producción y calidad) para asegurar la mejora del sistema en base a los planes de acción.

En base a lo expuesto en los párrafos anteriores, se puede afirmar que dentro del área de producción, solo existieron cambios en la etapa de flotación ya que se identificó como la etapa crítica en el sistema, por lo que no se llevaron a cabo acciones correctivas en las demás etapas del proceso extractivo, esto en consecuencia de que al coordinarse el departamento de mantenimiento y producción se estableció la verificación y supervisión de la correcta funcionalidad de los equipos (molinos, quebradoras, filtros, etc.), por lo que no requirió de un cambio en el proceso para su solución.

Cuadro 1.5 Estrategias de solución

Problema a Resolver	Estrategia de Solución	Modificaciones en el proceso
Variabilidad en composición de la muestra	Una vez implementados los gráficos de control, se tendrá control de los porcentajes quedando dentro de las especificaciones de calidad.	Si, se establecieron los límites de control de las especificaciones quedando fundamentado en las hojas de proceso y de análisis del concentrado.
Equipos de medición descalibrados	Dar seguimiento al programa de calibración y verificación de equipos, con la finalidad de contar con equipos de medición confiables	No requirió de un cambio en el proceso para su solución.
Generación de gases y polvos durante el proceso de ensaye (contaminación de muestra)	Definir prioridades de atención de las exposiciones de la muestra y capacitación del personal.	No requirió de un cambio en el proceso para su solución.
El operador decide realizar la toma de muestra de forma diferente	Las pesadas de cada materia prima tienen que ser exactas a lo indicado en la hoja de proceso.	No requirió de un cambio en el proceso para su solución.
Tiempo de identificación en el equipo no especificado en procedimiento	Corrección de hojas técnicas Capacitación general de los operadores en equipos.	Si, se estableció en la hoja de proceso el tiempo de identificación en el equipo de EAA, capacitando a todo el departamento de laboratorio.
Gran cantidad de muestras a analizar por día	Definir prioridades de atención de la muestras.	No requirió de un cambio en el proceso para su solución.
Incumplimiento en metodología por poca consulta	Supervisión adecuada por parte del departamento de laboratorio Establecer prioridades de atención en el cumplimiento de procedimiento	No requirió de un cambio en el proceso para su solución.
Fallas en etapa de filtración: <ul style="list-style-type: none"> • Rotura del filtro • Colocación incorrecta del filtro 	Colocación y medida (micras) adecuada del filtro para evitar rotura o saturación de grumos.	Si, se estableció en la hoja de proceso un apartado sobre la verificación de las condiciones del filtro y su correcta colocación
Rotación de analistas en prueba de identificación con equipo de EAA	Supervisión adecuada por parte del departamento de laboratorio para la organización del personal y seleccionar apropiadamente a los analistas encargados de identificación.	No requirió de un cambio en el proceso para su solución.
Competencia del personal técnico nuevo y antiguo	Establecer la programación y realización de mediciones para determinar la repetibilidad y reproducibilidad en los casos que sea posible.	Si, se creó un documento con las pruebas de validación de métodos analíticos, verificado por el supervisor de Laboratorio.

Fuente: Elaboración en base a plan de acción

En el siguiente capítulo se muestran los resultados de la implementación de los gráficos de control.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

En esta sección se describen a detalle los resultados obtenidos con la implementación del control estadístico de procesos, en donde se observa principalmente el cambio en los gráficos de control del proceso así como el modelo matemático implementado que se enfoca a los gráficos de control (Levey- Jennings).

Como ya se mencionó en el capítulo anterior después del análisis del problema e identificación de sus causas, se trabajó en forma paralela con otros departamentos de la empresa como son producción y mantenimiento en la implementación de los gráficos de control. De las estrategias que se citan en la Tabla 3.6, se llevaron a cabo en forma inmediata aquellas que no requieren modificaciones en el proceso de extracción, en su mayoría los cambios se llevaron a cabo en los formatos de producción, como se mencionó antes. Y con la ejecución en tiempo y forma de los mantenimientos preventivos de los equipos y la planeación de un programa de capacitación para los operarios del Laboratorio de Calidad de la empresa. A la fecha el programa de capacitación se ha llevado en un 60%, mientras tanto solo el personal calificado puede realizar las pruebas de absorción atómica.

Supervisión en etapas de proceso de extracción

Como ya se había mencionado anteriormente se llevó a cabo una supervisión estricta en las etapas críticas del proceso principalmente en las zonas en las cuales se tiene una mayor desviación en las propiedades del producto final, dejando establecido en los formatos técnicos el seguimiento de dichas revisiones de la funcionalidad de la maquinaria llevando a cabo mantenimientos preventivos mensuales así como también la atenta revisión en la adición de reactivos en la etapa de flotación. Dentro de las etapas importantes en las cuales se llevó a cabo la supervisión fueron las siguientes:

- **Muestreo:** Para que el muestreo sea confiable, el lote debe ser homogéneo, es decir que las unidades tienen que provenir de las mismas máquinas, las mismas materias primas y deben ser inspeccionadas por el mismo operador, es decir, debe de ser repetible el resultado de EAA.

- Exploración (Primer etapa extractiva): De acuerdo a los resultados arrojados por el laboratorio de planta concentradora acerca de las muestras provenientes del grupo de exploración es como se estructuran las zonas de trabajo diariamente, por tanto que se llevó a cabo una revisión del trabajo de las primeras etapas de la extracción para que las muestras tomadas de la beta o yacimiento no resultaran tan variables en su composición, es decir, asegurar que el lote tuviera un porcentaje de metal esperado.

Filtración

El filtrado es una etapa importante en el proceso de análisis por Vía Húmeda ya que si se realiza adecuadamente evita un alargamiento en el tiempo de éste. Ello obedece a que un mal filtrado ocasiona el paso de grumos al producto e involucra obtener valores bajos en el análisis de EAA. Este problema no se presentaba con la misma frecuencia antes de la Implementación, sin embargo al evaluar las propiedades de los 25 lotes se encontró que el 58% debía de filtrarse nuevamente, ello ocasionó una revisión de los filtros, la solución fue indicar el adecuado tamaño del filtro y la adecuada colocación de los filtros en los embudos en las hojas técnicas.

La temperatura también juega un papel importante en el proceso de filtrado ya que si no se filtra a la temperatura marcada en la hoja de proceso, puede prolongar el tiempo de filtrado y por ende el tiempo de proceso; es por eso que se las instrucciones se redactaron con un lenguaje sencillo y con indicaciones puntuales para que el operador no tuviera dificultad en seguirlas.

Integración de documentos técnicos

Se realizó la modificación en las hojas técnicas del proceso principalmente en la cantidad de muestra, tiempo de identificación dentro del equipo de EAA y ajuste de temperatura. Los cambios en la hoja de análisis fueron donde se señalan las nuevas especificaciones y los métodos de medición de cada propiedad.

Competencia del personal técnico antiguo y nuevo

El problema de la competencia del personal técnico antiguo y nuevo que se mencionó en el capítulo anterior fue resuelto mediante un documento que contiene un lenguaje sencillo donde se colocaron todas las características del producto y su método de análisis, para evitar que los operadores se confundieran; además, se llevaron evaluaciones a cada analista sobre su ejecución del método analítico lo que permitió establecer un programa de capacitación del personal que no conocía o no dominaba el manejo del equipo de EAA. Obteniendo así, un porcentaje del 80% del personal capacitado para realizar el análisis por absorción atómica integrando de manera más estable una programación en el personal técnico altamente competente.

Gráfico de Control Final

Como se explicó en el capítulo anterior, la modificación de los gráficos de control se llevó a cabo como resultado de establecer un mayor control en todo el proceso de extracción y realizando el mantenimiento preventivo de los equipos e instrumentos,

Examinando las figuras 3.4, 3.5 y 3.6 se puede notar que en su mayor parte los resultados de las muestras quedan fuera de los límites de control deseables. Indudablemente fue necesario recalcular estos límites para otras 25 muestras, después de que se trabajó para mejorar el proceso. Al calcularse los nuevos límites de control, se compararon con los resultados de las muestras inicialmente tomadas para el primer cálculo de los límites de control, demostrando satisfactoriamente que al llevar a cabo las acciones antes descritas, los porcentajes de metal están dentro de los valores estimados. Es decir, estos indicaron que el proceso se encontraba controlado al manifestar una menor desviación en los resultados obtenidos por la técnica de absorción atómica lo que involucra que en las etapas del proceso extractivo se obtuvo una operación más precisa.

El objetivo de los nuevos límites de control calculados fue el de reflejar la mejoría que se introdujo a las condiciones del proceso como resultado de la investigación de las muestras fuera de los límites de control. Oficialmente no se establecieron límites del

proceso hasta completar el programa de mejoramiento, a fin de juzgar si los resultados del mejoramiento eran satisfactorios. En la siguiente tabla se muestran los datos del porcentaje de plomo de los lotes de junio y julio de 2012.

Tabla 1.7 Datos correspondientes a 25 lotes de concentrado de plomo producidos en los meses de junio y julio de 2012.

No.	Porcentaje de Plomo (%)
1	22.39
2	22.57
3	21.69
4	22.23
5	22.34
6	22.07
7	22.43
8	21.98
9	21.77
10	22.16
11	21.90
12	22.45
13	21.83
14	22.38
15	22.38
16	22.28
17	22.00
18	21.85
19	22.06
20	21.91
21	21.72
22	22.34
23	22.06
24	22.18
25	22.03
Media	22.12
Desviación Estándar	0.25

Fuente: Datos emitidos por el Laboratorio

Como se mencionó, la variabilidad del proceso disminuyó, la desviación estándar es menor a 0.5%, lo que asegura que el proceso de extracción y los procesos de los análisis de laboratorio están estandarizados.

A continuación se muestran los diagramas de control final de los productos finales (concentrados de plomo, cobre y zinc), se tomaron en cuenta 25 lotes de cada concentrado de los meses de junio a julio del 2012, en el cual se puede apreciar que gracias a la implementación del control estadístico del proceso, la variabilidad entre los resultados disminuyó y su exactitud mejoró.

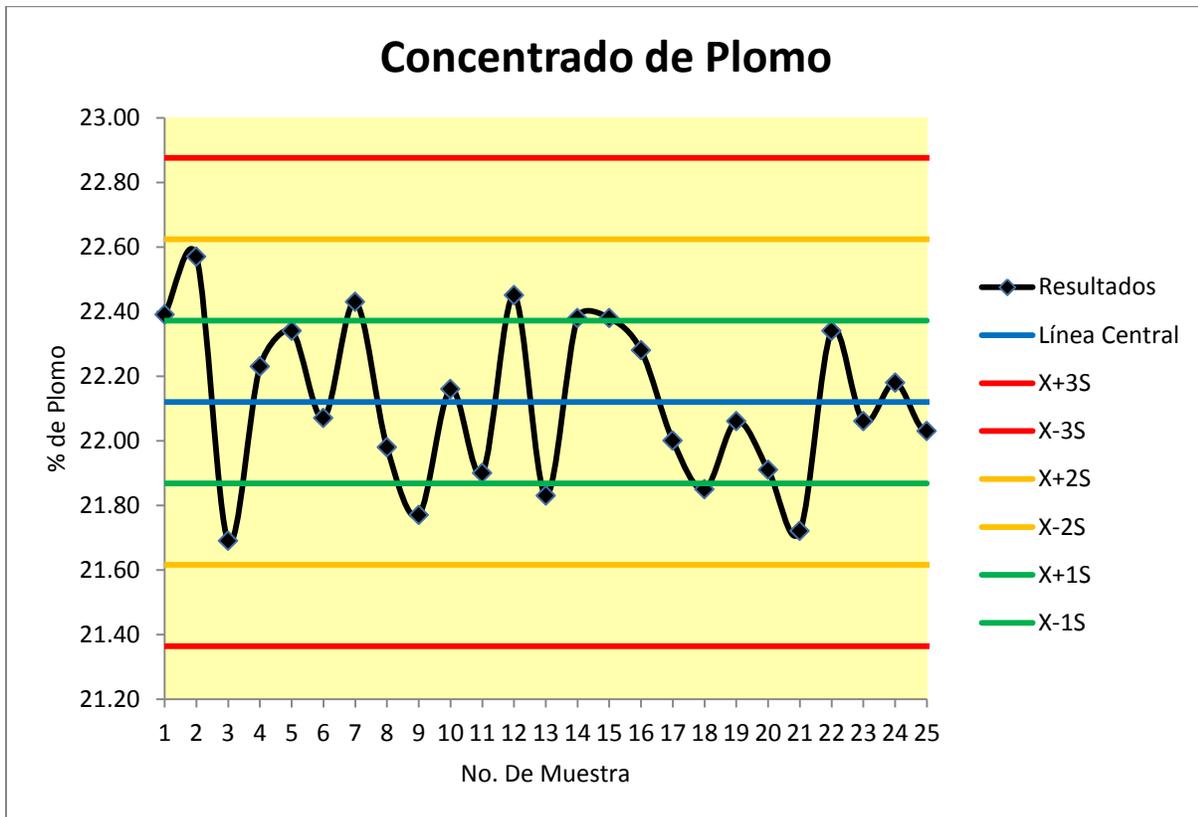


Fig. 4.1 Gráfico de control final Plomo

Fuente: Elaboración en base a datos emitidos por el Laboratorio

En la siguiente tabla se muestran los porcentajes obtenidos para el zinc.

Tabla 1.8 Datos correspondientes a 25 lotes de concentrado de Zinc producidos en los meses de junio y julio de 2012.

No.	Porcentaje de Zinc (%)
1	50.23
2	50.35
3	50.12
4	50.22
5	50.27
6	50.23
7	50.33
8	50.12
9	50.31
10	50.27
11	50.32
12	50.32
13	50.21
14	50.33
15	50.39
16	50.21
17	50.33
18	50.36
19	50.32
20	50.31
21	50.18
22	50.27
23	50.24
24	50.27
25	50.50
Media	50.27
Desviación Estándar	0.08

Fuente: Datos emitidos por el Laboratorio

La gráfica de control de procesos para el porcentaje de zinc se muestra a continuación.

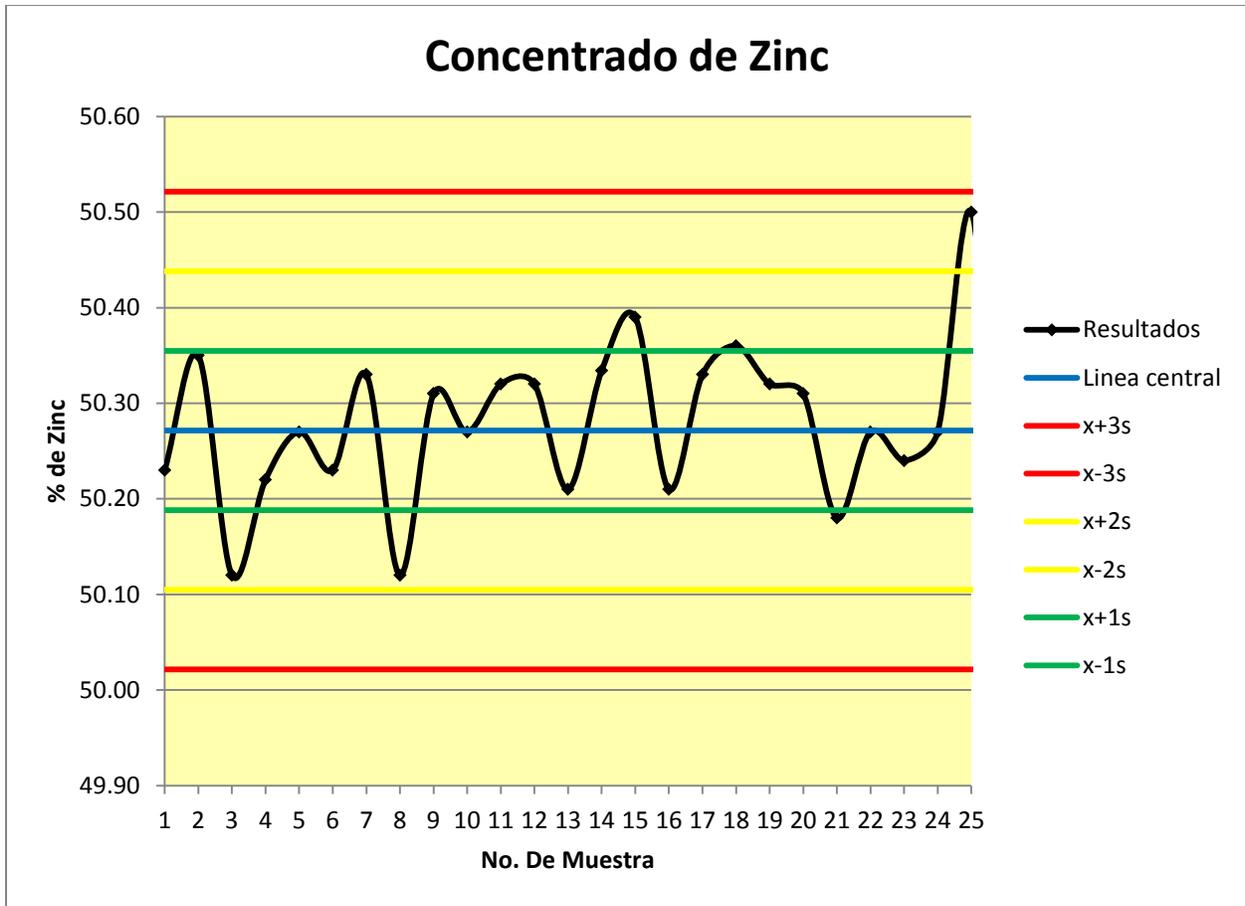


Fig. 4.2 Gráfico de control final Zinc

Fuente: Elaboración en base a datos emitidos por el Laboratorio

Es posible observar en la Figura 4.2 que la variabilidad del proceso disminuyó, la desviación estándar es menor a la inicial. Por lo que es posible asegurar que el mantenimiento preventivo así como las acciones correctivas en el proceso de extracción y los procesos de los análisis de laboratorio resultaron de manera satisfactoria para la empresa.

Por último, se muestran los porcentajes obtenidos de cobre en el periodo de junio a julio de 2012.

Tabla 1.9 Datos correspondientes a 25 lotes de concentrado de Cobre producidos en el mes de junio y julio de 2012.

No.	Porcentaje de Cobre (%)
1	27.01
2	27.37
3	27.07
4	26.90
5	26.90
6	26.68
7	27.60
8	27.01
9	26.91
10	27.39
11	26.99
12	26.65
13	27.08
14	27.28
15	27.32
16	27.29
17	27.77
18	26.80
19	27.10
20	27.14
21	27.64
22	26.66
23	26.69
24	27.27
25	27.31
Media	27.23
Desviación Estándar	0.45

Fuente: Datos emitidos por el Laboratorio

Para este metal, la gráfica de control estadístico de proceso final se muestra a continuación.

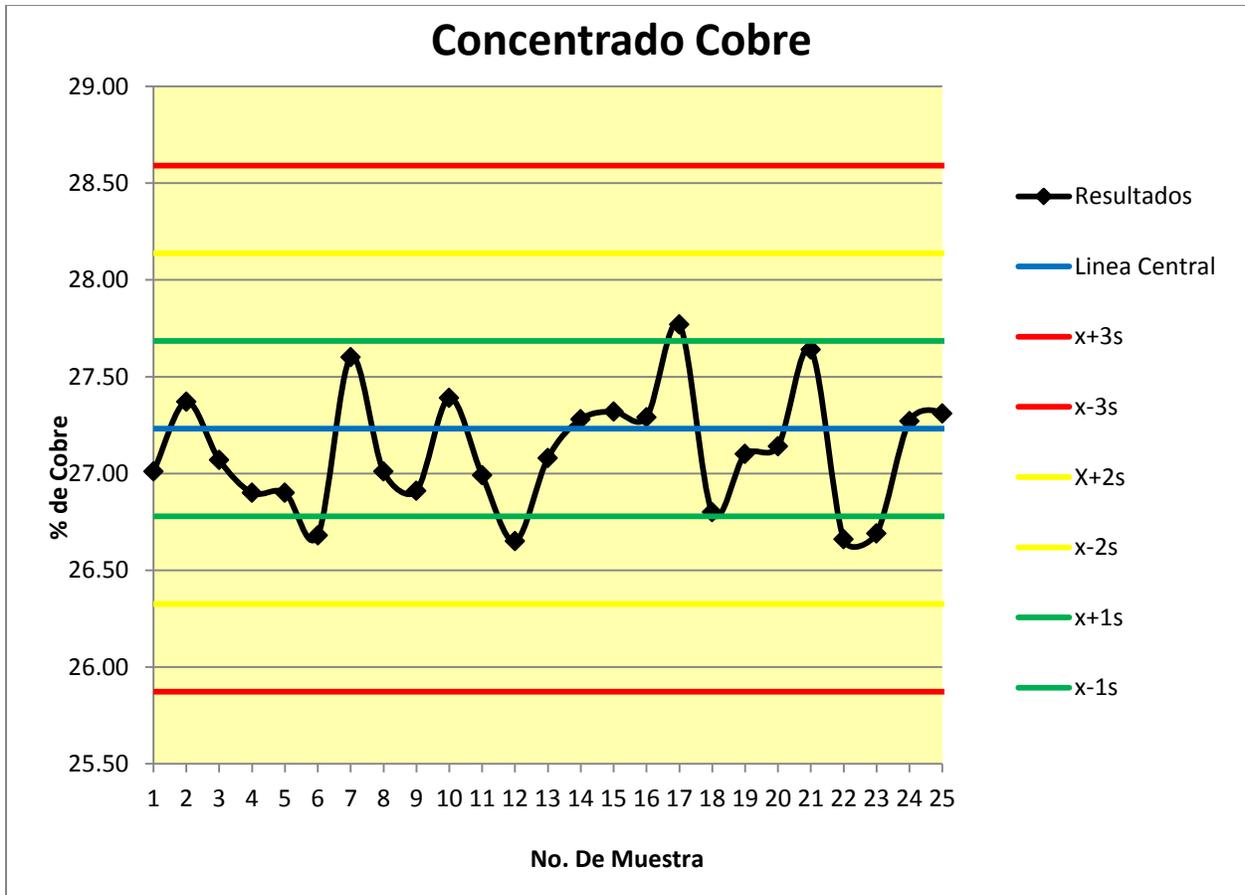


Fig. 4.3 Gráfico de control final Cobre

Fuente: Elaboración en base a datos emitidos por el Laboratorio

En definitiva, los resultados obtenidos mediante las estrictas medidas antes mencionadas (límites de control y supervisión), permitieron establecer una cultura de calidad, que impactó positivamente en el personal y en la dirección, estableciendo para los primeros programas de capacitación y para los segundos reafirmar su compromiso con la calidad.

Finalmente se obtuvo una disminución en la variabilidad de los porcentajes del metal, esto en consecuencia permitió disminuir los límites de control. La presencia de un estado de control estadístico facilita la permanencia de un enfoque de mejora en los puntos de proceso como son las etapas extractivas y las etapas de concentración en la

producción de concentrados minerales, utilizando el método de absorción atómica para la determinación e inmediata solución de cualquier desviación en el proceso.

Entre los principales beneficios de automatizar el sistema de gestión de la calidad se cuentan el de mantener en forma ordenada y fácil acceso la documentación del sistema, agilizar la comunicación entre los distintos actores, la rápida atención de no conformidades y definición de acciones correctivas según el flujo establecido en el modelo, todas estas actividades tendrán responsables definidos y su estado puede consultarse en tiempo real eliminando de esta manera, superposiciones de tareas o indeterminación de responsabilidades. Adicionalmente, el control estadístico de proceso facilitará la obtención de indicadores favoreciendo de esta manera la toma de decisiones.

Al mantener el sistema en control, la empresa ha establecido dentro de sus políticas de calidad que se debe tener un 0% de no conformidades, reforzando el principio de un sistema de mejora continua.

En resumen, para la empresa la excelencia debe alcanzarse mediante un proceso de mejora continua. Mejora en todos los campos, en las capacidades del personal, eficiencia de los recursos, entre los miembros de la organización, lo cual se traduce en una mejora de la calidad de los productos.

Es importante resaltar que dentro de Grupo Peñoles la calidad en los procesos de la empresa se mide a través del desempeño de todos los empleados, denotando que misma una evaluación se hace en dos momentos: una evaluación por el jefe inmediato midiendo resultados y otra al llevar a cabo una autoevaluación, donde se fomentan valores ya que los empleados deben de ser honestos. En este sentido, fue favorable llevar a cabo la implementación no solo para la mejora en la calidad del proceso y los productos sino que esto a su vez impactó en el índice de desempeño. Estos índices entre los periodos de febrero a mayo de 2012 fue en promedio del 72%, mientras que el promedio de los meses de junio a agosto fue del 95%, reconociendo que los

principales logros fueron la disminución de lotes rechazados o en reproceso, y la disminución de gasto en análisis

CONCLUSIONES

Se identificaron las causas que originaban las diferencias entre los resultados de los dos laboratorios y se les dio solución, cumpliendo con el objetivo planteado al inicio de este trabajo.

El problema principal fue la disminución de la variabilidad en los resultados obtenidos durante el análisis por EAA, esto se logró con la implementación de un control estadístico de procesos para el porcentaje de metal. Esto fue posible una vez que se atendieron los aspectos técnicos en el personal y los materiales, así como también su capacitación para la utilización de dichas gráficas. Y la atención a problemas presentes en el proceso de extracción.

La adopción de un modelo estandarizado para la Gestión de la Calidad, en la empresa ha dado como principal resultado tener un menor porcentaje de variabilidad en el producto, esto originado por acciones realizadas diariamente en la labor de producir concentrados minerales, así como también la decisión de implementar el control estadístico dentro del proceso.

En el área de producción se pueden establecer acciones para la prevención de porcentajes de metal fuera de especificaciones, y con ello una disminución en costos por re trabajo y desperdicios innecesarios.

Por otro lado, el propósito de este proyecto también favorece a la posible certificación por tercera parte del sistema de gestión de la calidad interno, estableciendo un modelo para la ampliación del alcance de este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Montgomery C. Douglas (2004). *Control estadístico de la calidad*. Tercera edición. México. Editorial Limusa Wiley.
- [2] Bravo Juan (1994), *Kaoru Ishikawa*, Tercera edición. Madrid España. Editorial Díaz de Santos.
- [3] Oakland, John (2002), *Statistical Process Control*. 6 edition. EU. Butterworth-Heinemann.
- [4] Crosby, R. P. (1987), *Calidad no cuesta*. México. Editorial continental.
- [5] Manual de Calidad Tec. de Monterrey, (2001). *7 Herramientas de la administración de la Calidad*.
- [6] Juran, J.M (1990) *Manual de Control de la Calidad*. Barcelona. Bimingham.
- [7] Manual De Control Estadístico De Procesos [página de internet] México 2001 Disponible en <http://www.matematicasypoesia.com.es/>
- [8] Harvey C. Charbonneau (2000): *Control de calidad*. México Mc. Graw Hill.
- [9] Armand V. Feigenbaum (2007): *Control total de la calidad*. México, Ed. Continental.
- [10] Walpole R.E., Myers R.H., Myers (1998): *"Probabilidad y Estadística para Ingenieros"*, Ed. Prentice Hall, 6ª edición.
- [11] Gutiérrez, Humberto y Vara, Román. (2009). *Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma*. 2ª Ed. McGraw-Hill. México.
- [12] Pola Maseda, A. (1988): *Aplicación de la Estadística al Control de Calidad*. Marcombo.
- [13] Navarrete, E. (1998): *Control Estadístico de la Calidad: Control Estadístico de Procesos*. Editorial Adhara.
- [14] Duncan, A.J. (1986) *Quality control and industrial statistics* (5th ed.). Homewood, Illinois: Ed. Irwin, R.D. Inc.
- [15] B.A. Wills. (1979) *Mineral Processing Technology, an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*, 2ª Ed, Pergamon Press Ltd
- [16] Ryan, T.P. (2002): *Statistical Methods for Quality Improvement*. Eu, Wiley.
- [17] James Paul (1997), *Gestión de la calidad total*, Editorial Prentice Hall.

- [18] Pérez Fernández De Velasco, José Antonio (1999). *Gestión de la calidad orientada a los procesos*. Madrid. Editorial Esic.
- [19] Salgueiro, A. (2001) *Como mejorar los procesos y la productividad*. Madrid España Editorial Aenor.
- [20] E.L. Grant, R.S. Leavenworth (1988). *Statistical Quality Control*, McGraw-Hill, Inc., New York.
- [21] López Rey, Susana (2006). *Implantación de un sistema de calidad: los diferentes sistemas de calidad existentes en la organización*, Ed. Ideas propias, España.
- [22] Cortés Ruíz Velasco, José Francisco (2010). *Procesos de Extracción y Concentración de Minerales*, [página de internet] Disponible en: <http://galeon.com/quimica3cch/MINEROMET/Sepycon.pdf>, México.
- [23] González, Rudy (2010), *Distribución normal*, [página de internet] Disponible en: <http://rudy-gonzalez.blogspot.mx/2010/09/distribucion-normal.html>
- [24] García Bermejo, Ma. José (2006), *Técnico Especialista en Anatomía Patológica*, Editorial Mad, España.
- [25] Hernández Garza, Macario (2009), *Sistemas de Optimización y Estadística*, [página de internet] Disponible en: <http://optyestadistica.wordpress.com/2009/05/19/ejemplo-grafico-de-control-u-promedio-de-defectos-por-unidad-tamano-de-muestra-variable/>
- [26] Nwstephens (2006) *Time between eruptions and the duration of the eruption for the Old Faithful geyser in Yellowstone National Park, Wyoming, USA*, [página de internet] Disponible en: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oldfaithful3.png>
- [27] Manfenix (2012) *Hojas de Verificación*, [página de internet] Disponible en: <http://avibert.blogspot.com/2012/03/hojas-de-verificacion-calidad-total.html>
- [28] Millán, Antonio (2008), *Importancia de los diagramas de flujo*, [página de internet] Disponible en: <http://rockanlover.wikispaces.com/Importancia+de+los+diagramas+de+flujo>.
- [29] Raulshc (2013), *Histograma* [página de internet] Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Histograma>

[30] Caballero, Cecilia (2010), *Herramientas: Diagrama de causa y efecto*, [página de internet] Disponible en <http://hoy-6sigma.blogspot.mx/2010/09/herramientas-diagrama-de-causa-y-efecto.html>

[31] Shcrushervip (2012), *Componentes del Molino de bolas*, [página de internet] Disponible en:

<http://www.trituradoras-machacadora.mx/blog/componentes-del-molino-de-bolas.html>

[32] CODELCO (2012), *Extracción por solventes*, [página de internet] Disponible en: https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/tecnicos_lixiviacion_extraccion.asp

[33] Longji (2010) *Shanghai Longji Construction Machinery Company*, [página de internet] Disponible en: <http://www.shlongji.com.es/vibrating-screen.html>

[34] Jesús (2009), *Diagrama de Pareto*, [página de internet] Disponible en: <http://calidadindustriaalimentaria.wordpress.com/tag/diagrama-de-pareto/>

ANEXOS

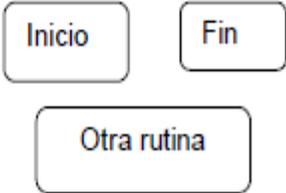
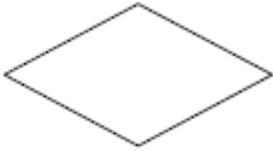
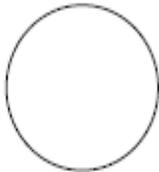
Anexo 1

Tabla A1. Tabla de constantes para gráficos de control \bar{x} , R
Factores para construir diagramas de control de variables

Observaciones en la muestra n	Factores para límites de control			Factor para línea central d ₂	Factores para límites de control		
	A ₁	A ₂	A ₃		D ₂	D ₃	D ₄
2	2.121	1.880	2.659	1.128	3.686	0	3.267
3	1.732	1.023	1.954	1.693	4.358	0	2.574
4	1.500	0.729	1.628	2.059	4.698	0	2.282
5	1.342	0.577	1.427	2.326	4.918	0	2.114
6	1.225	0.483	1.287	2.534	5.078	0	2.004
7	1.134	0.419	1.182	2.704	5.204	0.076	1.924
8	1.061	0.373	1.099	2.847	5.306	0.136	1.864
9	1.000	0.337	1.032	2.970	5.393	0.184	1.816
10	0.949	0.308	0.975	3.078	5.469	0.223	1.777

Anexo 2

Simbología diagrama de flujo

Componente	Descripción	Símbolo
Terminal	Se utiliza para representar el comienzo o el final del proceso, sus zonas de frontera o para referirse a otro proceso que no es el objeto de estudio.	
Operación	Representa una medida para crear, procesar, analizar. Este símbolo se utiliza también como una descripción de operación.	
Decisión	Indica un punto en el proceso en donde se presentan acciones limitadas, donde hay caminos alternos si se producen ciertos acontecimientos.	
Conector	Indica que la secuencia sigue la corriente.	
Conexión con otros procesos	Nombramos un proceso independiente que en algún momento aparece relacionado con el proceso principal.	

Operación manual

Operación realizada
manualmente.

