

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLOGICA MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS

**OPTIMIZACIÓN DEL TIEMPO DE ANÁLISIS DE HUMEDAD POR SECADO EN EL
DESPACHO DE CONCENTRADO DE COBRE EN LA COMPAÑÍA MINERA ANTAPACCAY –
CUSCO
(INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)**

PRESENTADO POR:

Br. ROBERT FLORES CCOLQQUE

Br. HOLGER JASMANY HERMOZA CAVIDES

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
METALURGICO**

ASESOR:

Mg. HONORATO SANCHEZ QUISPE

CUSCO – PERÚ

2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada:.....

Optimización del Tiempo de Análisis de Humedad por
Secado en el Despacho de Concentrado de Cobre en la
Compañía Minera Antapaccay - Cusco¹ (Investigación Tecnológica)

presentado por: Halger Jasmery Hermosa Caudes con DNI Nro.: 72132879 presentado

por: Robert Flores Ccolaque con DNI Nro.: 47447541 para optar el
título profesional/grado académico de Ingeniero Metalúrgico

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el
Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la**
UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 05 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o
título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto**
la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 26 de Febrero de 2025



Firma
Post firma Alexander Sanchez Quispe

Nro. de DNI 23903892

ORCID del Asesor 0000-0002-4267-2636

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259:9341B989

FLORES CCOLQQUE ROBERT HERMOZA CAVIDES H...

OPTIMIZACIÓN DEL TIEMPO DE ANÁLISIS DE HUMEDAD POR SECADO EN EL DESPACHO DE CONCENTRADO DE COBRE EN

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:434113989

181 Páginas

Fecha de entrega

25 feb 2025, 11:45 p.m. GMT-5

33,583 Palabras

Fecha de descarga

26 feb 2025, 12:59 a.m. GMT-5

182,258 Caracteres

Nombre de archivo

TESIS_OPTIMIZACION_HUMEDAD_sut y corre.pdf

Tamaño de archivo

5.9 MB

5% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 5%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 2%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión



Texto oculto

10 caracteres sospechosos en N.º de páginas

El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

PRESENTACIÓN

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Señores miembros del Jurado Calificador de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.

En cumplimiento al reglamento de grados y títulos vigente de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, ponemos a vuestra disposición nuestra Tesis intitulado:

OPTIMIZACIÓN DEL TIEMPO DE ANÁLISIS DE HUMEDAD POR SECADO EN EL DESPACHO DE CONCENTRADO DE COBRE EN LA COMPAÑÍA MINERA

ANTAPACCAY – CUSCO

(Investigación Tecnológica)

Este trabajo tiene como finalidad aplicar los conocimientos académicos, científicos y técnicos para optimizar el tiempo de análisis de humedad por secado de las muestras de concentrado de cobre de despacho de la planta concentradora de Antapaccay y de esta manera reducir el consumo energético, reducir las horas/hombre trabajadas y aumentar la producción de secado para mejorar el reporte de humedades de concentrado de cobre.

FLORES CCOLQQUE ROBERT

HERMOZA CAVIDES HOLGER JASMANY

DEDICATORIA

A Dios por darme sabiduría y fuerza durante todo el proceso de mi investigación; a mis padres por su apoyo incondicional, su esfuerzo y perseverancia fueron un ejemplo a seguir, por estar siempre a mi lado en los buenos y malos momentos y en cada paso que eh dado para poder lograr este tan anhelado objetivo, gracias.

HERMOZA CAVIDES HOLGER JASMANY

A mis padres, por su constante apoyo, comprensión y amor incondicional. Gracias por haberme brindado todas las herramientas necesarias para alcanzar mis metas académicas. Su sacrificio y esfuerzo han sido la motivación que me ha impulsado hasta este momento.

FLORES CCOLQQE ROBERT

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo optimizar el tiempo de análisis de humedad por secado de las muestras de concentrado de cobre de Antapaccay, este se trata de una investigación de carácter experimental, en donde se aplicó el método científico con un alcance correlacional, explicativo. La población seleccionada abarcó el concentrado de cobre final que hay en el almacén de concentrados de cobre de Antapaccay, la muestra representativa se tomó de camiones cargados de concentrado de cobre que salen de mina rumbo al puerto Matarani, la variable dependiente fue el tiempo de análisis de humedad por secado utilizando como instrumento de medición un cronometro para calcular el peso de la muestra con un periodo de 30 minutos de secado; se utilizó el diseño experimental 2^3 y expresado en función de las 3 variables: temperatura de secado, peso de la muestra, pericia del analista, con un nivel de confianza del 95% y un coeficiente regresión ajustada de 0.9887, se indicó que la variable dependiente está perfectamente explicada por la ecuación de regresión en unidades no codificadas (natural) es: TIEMPO DE ANALISIS (Y) = $9.17 - 0.0333 \text{ TEMP. SECADO } (^{\circ}\text{C}) + 0.0083 \text{ PESO MUESTRA (kg)} + 1.67 \text{ PERICIA} + 0.000833 \text{ TEMP. SECADO } (^{\circ}\text{C}) * \text{PESO MUESTRA (kg)} - 0.0333 \text{ TEMP. SECADO } (^{\circ}\text{C}) * \text{PERICIA} - 0.042 \text{ PESO MUESTRA (kg)} * \text{PERICIA} + 0.00083 \text{ TEMP. SECADO } (^{\circ}\text{C}) * \text{PESO MUESTRA (kg)} * \text{PERICIA} + \varepsilon$. En estas condiciones, el tiempo de análisis de humedad alcanzado fue aproximadamente de 5 horas, lo que nos permitió aceptar la hipótesis de investigación planteada.

PALABRAS CLAVE: Análisis de humedad de concentrado de cobre, Tiempo de secado de concentrado de cobre, Control de calidad de concentrado de cobre.

ABSTRACT

The objective of this research work was to optimize the time of moisture analysis by drying of the samples of copper concentrate from Antapaccay, this is an experimental research, where the scientific method was applied with a correlational, explanatory scope. The selected population covered the final copper concentrate in the Antapaccay copper concentrate warehouse, the representative sample was taken from trucks loaded with copper concentrate that leave the mine on their way to the port of Matarani, the dependent variable was the time of moisture analysis by drying using a stopwatch as a measurement instrument to calculate the weight of the sample with a period of 30 minutes of drying; The experimental design 2^3 was used and expressed according to the 3 variables: drying temperature, sample weight, analyst expertise, with a confidence level of 95% and an adjusted regression coefficient of 0.9887, it was indicated that the dependent variable is perfectly explained by the regression equation: ANALYSIS TIME (Y) = 9.17 - 0.0333 Drying temperature ($^{\circ}$ C) + 0.0083 Sample Weight (kg) + 1.67 Analyst Expertise + 0.000833 Drying temperature ($^{\circ}$ C)* Sample Weight (kg) - 0.0333 Drying temperature ($^{\circ}$ C)* Analyst Expertise - 0.042 Sample Weight (kg)* Analyst Expertise + 0.00083 Drying temperature ($^{\circ}$ C)* Sample Weight (kg)* Analyst Expertise + ϵ ; Under these conditions, the humidity analysis time achieved was approximately 5 hours, which allowed us to accept the research hypothesis raised.

KEYWORDS: Moisture Analysis of Copper Concentrate, Copper Concentrate Drying Time, Copper Concentrate Quality Control.

INTRODUCCIÓN

En nuestro país contamos con grandes yacimientos de cobre y polimetálicos, como se sabe, el Perú es segundo productor de cobre a gran escala en el mundo. Dadas las peculiaridades de nuestra geología, estos metales tienen una estimación económica importante en el mercado internacional, por lo que múltiples empresas mineras financian en la extracción de estos metales para eventualmente ponerlos en el mercado, generando ingresos económicos por cada metal, por otro lado, también crear oportunidades de trabajo para personas con grados técnicos y para profesionales universitarios.

El control de calidad y la comercialización de productos finales como los concentrados de cobre requieren evaluaciones precisas y estrategias de evaluación efectivas para lograr sus objetivos de manera confiable y segura, como el muestreo de concentrado, la determinación del porcentaje de humedad del concentrado y determinación de la ley de concentrado. En este trabajo nos enfocaremos en lo segundo, la determinación de humedad del concentrado por medio del secado; que es de suma importancia para la comercialización de concentrado, ya que a cierto contenido de humedad, generalmente a mayor contenido de humedad el concentrado tiende a comportarse de manera particular, pierde la propiedad de cohesión para el carguío y transporte, generando demasiada polución, contaminando a los demás lotes y alterando o sesgando el % de humedad en la hora de muestreo; también se separa el sólido del líquido del concentrado conocido también como la licuefacción del concentrado, perjudicando en gran manera a la comercialización del concentrado pues esto repercute en el transporte haciéndolo casi imposible su comercialización por

temas de seguridad y por temas de rentabilidad pues el concentrado que se vende, es comercializado por contenido metálico y no por porcentaje de humedad, es por ello la importancia de la determinación de humedad del concentrado de cobre para una mayor rentabilidad a la hora de comercializar dicho metal de cobre.

En este sentido, el área de Control de Calidad en Antapaccay utiliza cada vez mejores técnicas, herramientas y métodos para la determinación de humedad por deshumidificación durante el secado; sin embargo, se necesita un uso eficiente de estos recursos para lograr una posición competitiva y minimizar errores en los procesos de laboratorio que terminan de dar a conocer los resultados de los análisis de concentrados de cobre que eventualmente se comercializarán; dado que se utilizan métodos e instrumentos de análisis de secado de concentrado de cobre que genera retrasos en los reportes de humedad, este trabajo investiga e identifica variables en el tiempo de análisis de humedad por secado, utilizando un enfoque de diseño experimental en el laboratorio, se evalúa las variables de más interés que afectan dicha operación y los resultados de los reportes de humedad posteriores; que aseguran parámetros óptimos y condiciones de trabajo controladas para resultados óptimos que generen la estabilidad financiera en el proceso de comercialización de minerales.

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Principales componentes de los concentrados y concentraciones típicas promedio..	11
Tabla 2 Operacionalización de variables e indicadores	59
Tabla 3 Plan de Análisis de Datos.....	64
Tabla 4 Peso de la muestra	67
Tabla 5 Coeficiente de variación para una masa de 20 incrementos.....	76
Tabla 6 Cálculos matemáticos para determinar el análisis de humedad de las muestras.....	82
Tabla 7 Cálculos para determinación de tiempo de análisis de humedad	83
Tabla 8 Balance de masa para el secado de concentrado	84
Tabla 9 Cálculo de la velocidad de Secado para una temperatura de 90 °C	90
Tabla 10 Cálculo de la velocidad de Secado para una temperatura de 110 °C	94
Tabla 11 Factores y niveles codificados de las variables independientes.....	101
Tabla 12 Planificación del diseño factorial en escala natural	102
Tabla 13 Matriz del diseño factorial, en escala natural y codificada	103
Tabla 14 Efecto de las variables principales y sus interacciones	110
Tabla 15 Contribución porcentual de los efectos	116
Tabla 16 Total de grados de libertad del modelo factorial.....	117
Tabla 17 Suma de cuadrados de los efectos	120
Tabla 18 Análisis de Varianza	125
Tabla 19 Toma de decisión del significado de las variables del proceso.....	126
Tabla 20 Coeficientes de regresión codificados.....	133
Tabla 21 Optimización del tiempo de análisis de secado del concentrado de cobre.....	136

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Planta concentradora Antapaccay	9
Figura 2 Diagrama de áreas en la concentradora de Antapaccay.....	10
Figura 3 Punto de valorización donde puede ocurrir la venta de un producto mineral	13
Figura 4 Despacho de concentrado Antapaccay	15
Figura 5 Zona de muestreo Antapaccay.....	16
Figura 6 Importancia del muestreo	18
Figura 7 Muestreo sistemático a diferentes profundidades.....	19
Figura 8 Muestreo estratificado	19
Figura 9 Muestreo manual	20
Figura 10 Muestreo automático	22
Figura 11 Modelos de interacción gas-sólido en los secadores.	32
Figura 12 Horno de secado rotatorio.....	34
Figura 13 Horno de secado por aire forzado.....	35
Figura 14 Diagrama para seleccionar el método de secado correcto	37
Figura 15 Modelo cinético del secado térmico de un aglomerado de partícula de concentrado de cobre	40
Figura 16 Curva de velocidad de secado	43
Figura 17 Diagrama de la curva de secado del tiempo vs contenido de humedad.....	44
Figura 18 Diagrama de fases del agua	46
Figura 19 Cambios de estado del agua en el diagrama de fases	48
Figura 20 Alteraciones del concentrado durante la operación de secado	49
Figura 21 Poder calorífico superior	50

Figura 22 Poder calorífico inferior.....	51
Figura 23 Ubicación geográfica Antapaccay	60
Figura 24 Diagrama de flujo para la operación de análisis de humedad	68
Figura 25 Muestras de concentrado para procedimiento experimental	69
Figura 26 Ingreso y selección de camión.....	71
Figura 27 Comandos de muestreo de camión	72
Figura 28 Muestreo de brazo Robótico	73
Figura 29 Peso Tara m1	74
Figura 30 Preparación mecánica de muestras húmedas.....	75
Figura 31 Toma de incrementos para las bandejas Y1 y Y2.....	76
Figura 32 Condición de peso constante	78
Figura 33 Balance de masa para las muestras de concentrado de cobre	84
Figura 34 Curva de Velocidad de Secado para una muestra a 90 °C.....	91
Figura 35 Curva de secado del tiempo vs contenido de humedad para 90 °C	92
Figura 36 Curva de Velocidad de Secado para una muestra a 110 °C.....	95
Figura 37 Curva de secado del tiempo vs contenido de humedad para 110 °C	96
Figura 38 Cubo de combinación de los factores A,B,C.....	104
Figura 39 Caja negra para la operación de secado de concentrado de cobre.....	106
Figura 40 Grafica normal de efectos de secado de concentrados de cobre.....	111
Figura 41 Diagrama de Pareto de los efectos, con un error de 5%	112
Figura 42 Efecto de los factores.....	113
Figura 43 Efecto de las interacciones de los factores	114
Figura 44 Valores de F de Fisher	124

Figura 45	Graficas de contorno de las variables tiempo, peso y temperatura de secado	127
Figura 46	Grafica de contornos de Tiempo, pericia y peso de la muestra	128
Figura 47	Gráfica de superficie tiempo de secado, peso de muestra y temperatura	129
Figura 48	Gráfica de superficie de tiempo de secado, pericia y temperatura	130
Figura 49	Determinación de la optimización del tiempo de análisis de humedad.....	137
Figura 50	Gráficos de residuos para el tiempo de análisis de humedad	139
Figura 51	Gráficos de probabilidad para la prueba de Ryan-Joiner	140
Figura 52	Gráfica de igualdad de varianzas de la variable tiempo con las réplicas	141
Figura 53	Prueba de Independencia de Durbin-Watson	142

SIMBOLOGÍA

A: Temperatura de secado

ASTM: American Society for Testing and Materials

ANOVA: Análisis de la Varianza

B: Peso de la muestra

C: Pericia del analista

CM_E: Cuadrado Medio del Error

DOE: Diseño de Experimentos

EPP: Equipo de Protección Personal

E: Experimentado

Gs: gravedad específica

g: gramo

kg: kilogramo

h: tiempo en horas de la operación de secado.

%h: Porcentaje de humedad

H: Porcentaje de hidrogeno contenido en el combustible.

INACAL: Instituto Nacional de la Calidad

ISO: International Organization for Standardization

JIS: Japanese Industrial Standards

Kg H₂O eliminada: Peso de agua que es eliminada al medio secante.

Kg conc. seco: Peso de concentrado total de la muestra.

LIMS: Laboratory Information Management System

M: Lote de muestrero

m1: Peso tara

m2: Peso bruto húmedo

m3: Peso bruto seco

N: Tamaño o número de muestra

NTP: Norma Técnica Peruana

p: peso del mineral

P: Principiante

PC: Peso constante

PCI: Poder Calorífico Inferior

PCS: Poder Calorífico Superior

ROM: Run of Mine

THL: Transport Humidity Limit

V(en peso): Velocidad de secado en función del peso.

X1: Humedad de la muestra A

X2: Humedad de la muestra B

X3: Humedad de la muestra C

X4: Humedad de la muestra D

Xmax: Máxima humedad de las muestras A, B, C, D.

Xmin: Mínima humedad de las muestras A, B, C, D.

α : Nivel de significación

CONTENIDO

PRESENTACIÓN.....	II
DEDICATORIA	III
RESUMEN	IV
PALABRAS CLAVE	IV
ABSTRACT	V
KEYWORDS.....	V
INTRODUCCIÓN	VI
INDICE DE TABLAS	VIII
INDICE DE FIGURAS	IX
SIMBOLOGÍA	XII
CONTENIDO.....	XIV
 1. CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	 1
1.1. <i>Planteamiento del Problema</i>	1
1.1.1. Situación Problemática	1
1.1.2. Formulación del Problema.....	2
1.2. <i>Justificación de la Investigación</i>	2
1.2.1. Conveniencia	2
1.2.2. Relevancia Social.....	3
1.2.3. Relevancia Tecnológica.....	3
1.2.4. Relevancia Ambiental	3
1.2.5. Valor Teórico.....	4
1.2.6. Utilidad Metodológica	4

1.3.	<i>Objetivos de la Investigación</i>	4
1.3.1.	Objetivo General.....	4
1.3.2.	Objetivos Específicos	4
2.	CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	5
2.1.	<i>Antecedentes Internacionales</i>	5
2.2.	<i>Antecedentes Nacionales</i>	5
2.3.	<i>Bases Teóricas</i>	8
2.3.1.	Descripción del Proceso.....	8
2.3.2.	Descripción de las operaciones en Antapaccay	9
2.3.3.	Aspectos Generales del Concentrado de Cobre y su Comercialización	10
2.3.4.	Despacho de Concentrado.....	14
2.3.5.	Muestreo	17
2.3.6.	Muestreo de Concentrado.....	20
2.3.7.	Humedad del Concentrado.....	22
2.3.8.	Embarque del Concentrado de Cobre, Peligros de Licuefacción	24
2.3.9.	Presión del Vapor.....	26
2.3.10.	Transferencia de calor	27
2.3.11.	Principios Básicos del Secado	29
2.3.12.	Clasificación de Secadores	29
2.3.13.	Tratamiento de Sólidos en los Secadores	30
2.3.14.	Hornos de Secado	32
2.3.15.	Secado del Concentrado	36
2.3.16.	Cinética de secado	38
2.3.17.	Termodinámica del Secado.....	45
2.3.18.	Determinación de la Temperatura de Secado	52
2.3.19.	Peso de la Muestra	53
2.3.20.	Pericia del Analista.....	54
2.4.	<i>Definición de Términos Básicos</i>	54
2.4.1.	Muestra Representativa	54

2.4.2.	Lote	54
2.4.3.	Incremento	55
2.4.4.	Selección de Incremento	55
2.4.5.	Preparación.....	55
2.4.6.	Conminución.....	55
2.4.7.	Muestra para Humedad.....	55
2.4.8.	Muestra de Laboratorio.....	55
2.4.9.	Homogenización	56
2.4.10.	Aglomerado	56
2.4.11.	Tamaño Máximo Nominal de Partícula	56
2.4.12.	Análisis Químico.....	56
2.4.13.	Error.....	56
2.4.14.	Sesgo.....	56
3.	CAPÍTULO III HIPÓTESIS Y VARIABLES	57
3.1.	<i>Hipótesis General</i>	57
3.2.	<i>Hipótesis Específicas</i>	57
3.3.	<i>Variables</i>	57
3.3.1.	Identificación de Variables.....	57
3.3.2.	Identificación de Indicadores.....	58
3.4.	<i>Operacionalización de Variables e Indicadores</i>	58
4.	CAPÍTULO IV METODOLOGÍA	60
4.1.	<i>Ámbito del Estudio, Localización Política, Geográfica</i>	60
4.1.1.	Coordenadas.....	60
4.2.	<i>Diseño de investigación: Método, Tipo, Alcance</i>	61
4.2.1.	Diseño de la Investigación	61
4.2.2.	Método de investigación	61
4.2.3.	Tipo de investigación	61
4.2.4.	Alcance de investigación.....	61
4.3.	<i>Población de Estudio</i>	62

4.3.1.	Población	62
4.3.2.	Muestra	62
4.3.3.	Tamaño de Muestra.....	62
4.3.4.	Técnicas de Recolección de Información	63
4.3.5.	Técnicas de Instrumentos de Recolección de Datos	63
4.3.6.	Técnicas de Procesamiento de Análisis de Datos	63
4.4.	<i>Validez y Confiabilidad de Instrumentos</i>	64
4.5.	<i>Plan de Análisis de Datos</i>	64
4.6.	<i>Infraestructura Disponible</i>	65
4.7.	<i>Equipos e Instrumentos</i>	65
5.	CAPÍTULO V RESULTADOS Y DISCUSIÓN	67
5.1.	<i>Procedimiento Experimental para el Muestreo</i>	67
5.1.1.	Peso de la Muestra	67
5.1.2.	Diagrama de Flujo Experimental.....	68
5.1.3.	Condiciones de la Muestra	69
5.1.4.	Condiciones Ambientales Requeridas.....	69
5.1.5.	Muestreo por Brazo Robótico.....	70
5.1.6.	Método de Muestreo Automático	70
5.2.	<i>Procedimiento Experimental para el Tiempo de Análisis de Humedad</i>	73
5.2.1.	Preparación Física de Muestras para Análisis de Humedad	73
5.2.2.	Secado para Análisis de Humedad	77
5.2.3.	Cálculos Matemáticos para Determinar el Análisis de Humedad de las Muestras.....	79
5.2.4.	Cálculos Matemáticos para Determinar el Tiempo de Análisis de Humedad de las Muestras de Concentrado de Cobre	82
5.2.5.	Balance de Materia para las Muestras de Concentrado de Cobre.....	83
5.2.6.	Balance de Energía para las Muestras de Concentrado de Cobre	85
5.2.7.	Cálculo de Cinética de Secado para las Temperaturas de 90 °C y 110 °C	88
5.3.	<i>Análisis Estadístico de Resultados</i>	96
5.3.1.	Análisis de las Pruebas de Humedad por Secado	96

5.3.2.	Modelo Estadístico Experimental	99
5.3.3.	Diseño Factorial	100
5.3.4.	Construcción de la matriz de diseño	101
5.3.5.	Representación Geométrica de las Combinaciones	103
5.3.6.	Variables Involucradas	105
5.3.7.	Contrastación de Hipótesis	107
5.3.8.	Modelo Matemático del Criterio de Optimización	108
5.3.9.	Determinación y Análisis de los Efectos Significativos	109
5.3.10.	Calculo y Análisis de Varianza	116
5.3.11.	Grados de Libertad del Diseño Experimental	117
5.3.12.	Análisis y Cálculo de los Cuadrados Medios	118
5.3.13.	Cálculo de F de FISHER	122
5.3.14.	Formulación de ANOVA	124
5.3.15.	Graficas de Contorno	126
5.3.16.	Graficas de Superficie	128
5.3.17.	Análisis de Regresión y Correlación	131
5.3.18.	Modelo Matemático	131
5.3.19.	Determinación de los Coeficientes de Regresión	132
5.3.20.	Formulación del modelo de regresión	134
5.3.21.	Cálculo del Coeficiente de Determinación " R^2 "	134
5.3.22.	Optimización del Diseño	136
5.3.23.	Verificación de la Adecuación del Modelo de Optimización	137
5.3.24.	Prueba de Normalidad de Ryan-Joiner	139
5.3.25.	Prueba de Varianza Constante Mediante la prueba de Levene	140
5.3.26.	Prueba de Independencia de Durbin-Watson	141
5.4.	<i>Discusión de Resultados</i>	143
CONCLUSIONES		146
RECOMENDACIONES		148

BIBLIOGRAFIA.....	149
ANEXO 1) MATRIZ DE CONSISTENCIA	153
ANEXO 2) CHECK LIST MUESTREADOR AUTOMÁTICO DE DESPACHO DE CONCENTRADOS (ROBOT).....	154
ANEXO 3) FORMATO DE VERIFICACIÓN DE TEMPERATURA DE HORNOS DE SECADO	156
ANEXO 4) PRESIÓN DE VAPOR DE AGUA LÍQUIDA ENTRE 0 °C Y 373 °C.....	157
ANEXO 5) FORMATO DE VERIFICACIÓN DE BALANZA ANALÍTICA	158
ANEXO 6) REGISTROS FOTOGRÁFICOS.....	159

Capítulo I

Planteamiento del Problema

1.1. Planteamiento del Problema

1.1.1. Situación Problemática

En la región Cusco, provincia de Espinar, distrito de Yauri se encuentra ubicado la Compañía minera Antapaccay S.A; donde se procesan minerales sulfurados de cobre como Calcopirita, Bornita, Calcosina, Covelina y Enargita; cuyo producto final es el concentrado de cobre con una ley promedio de 35% de Cu y un rango de porcentaje de humedad promedio de 6% a 13% siendo la humedad optima el menor contenido de humedad posible. Esta ley es determinada en el Laboratorio de Control de Calidad, donde inicialmente se realiza el muestreo del concentrado de cobre, el cual es muy importante pues una mala preparación de la muestra hace que los productos no sean simbólicos al total del lote; también se determina la humedad por medio del cálculo de peso perdido durante el secado en hornos industriales; esto es muy importante pues nos ayuda a evitar pérdidas de peso por mermas, así también como controlar la humedad para evitar la licuefacción del concentrado, pues si no se tomara en cuenta dicha humedad, conllevaría a grandes cantidades de pérdidas de dinero para la empresa, que se ve afectada en la comercialización del concentrado de cobre.

El problema reside en la necesidad de optimizar el tiempo de análisis de humedad por secado de las muestras de concentrado de cobre, ya que el tiempo empleado actualmente que es de 8 horas de secado, está generando demoras en los reportes de humedad, afectando el tiempo de los turnos de trabajo, produciendo un excesivo consumo energético, menor disponibilidad de los hornos de secado para

realizar mayor número de análisis de muestras para humedad. La solución que se plantea es optimizar el tiempo de análisis de humedad por secado de las muestras del despacho de concentrados de cobre de Antapaccay, evaluando la influencia de la temperatura de secado, peso de la muestra y pericia de analista.

1.1.2. *Formulación del Problema*

1.1.2.1. Problema General.

¿Cómo optimizar el tiempo de análisis de humedad por secado del despacho de concentrado de cobre de Antapaccay evaluando las variables más relevantes que intervienen en la operación?

1.1.2.2. Problemas Específicos.

- ¿Cómo determinar el tiempo de análisis de humedad por secado para las muestras del despacho de concentrado de cobre de Antapaccay, modificando dentro de los límites permisibles la temperatura de secado?
- ¿Cómo determinar el tiempo de análisis de humedad por secado para las muestras del despacho de concentrado de cobre de Antapaccay, variando dentro de los límites permisibles el peso de la muestra?
- ¿Cómo determinar el tiempo de análisis de humedad por secado para las muestras del despacho de concentrado de cobre de Antapaccay, tomando en cuenta la pericia del analista?

1.2. Justificación de la Investigación

1.2.1. *Conveniencia*

La optimización del tiempo de análisis de humedad por secado térmico de las muestras de despacho de concentrado de cobre en el horno generaría ahorros

energéticos en la operación porque se va a utilizar menos recursos energéticos y menos tiempo para obtener los mismos resultados de análisis de humedad. De esta forma se mejorará la disponibilidad de los hornos para secado y aumentaría la disposición de personal de trabajo.

1.2.2. Relevancia Social

Optimizando el tiempo de análisis de humedad se tendrá mejora en la zona de despacho de concentrado de cobre, por lo cual la minera Antapaccay será beneficiada, y con estos resultados la población en general y trabajadores obtendrán mejores beneficios y contribuirá a que se realicen proyectos con el fin del crecimiento de ambas partes.

1.2.3. Relevancia Tecnológica

La investigación planteada contribuirá a determinar el tiempo de análisis de humedad óptimo de las muestras de concentrados de cobre. De esta manera, no solo se mejorará el procedimiento técnico para el muestreo y determinación de humedad, sino que se tendrá mayor tiempo operativo entre turnos de trabajo para que no existan los problemas de falta de tiempo, tal y como se presentan en la actualidad.

1.2.4. Relevancia Ambiental

El tiempo de análisis de humedad por secado del concentrado de cobre cumple con todos los lineamientos ambientales de la Ley General del Ambiente Ley 28611 y Reglamento de Protección Ambiental para las Actividades de Exploración Minera D.S. Nro 042-2017-EM. El cual nos garantiza un impacto ambiental controlado.

1.2.5. Valor Teórico

Se describirán todos las operaciones y pasos a realizar para optimizar el tiempo de análisis de humedad por secado de muestras de concentrado de cobre, logrando detallar las variables más influyentes que servirán como guía base para posteriores investigaciones en el área de Control de Calidad en el despacho de concentrado de cobre de diferentes empresas mineras que requieran implementar dicha operación.

1.2.6. Utilidad Metodológica

Con nuestra investigación ayudaremos a crear un nuevo método para el tiempo de análisis y reporte de humedades en el despacho de concentrado de cobre, partiendo de evaluar y relacionar las variables más resaltantes para optimizar la operación de secado en el despacho de concentrado de cobre.

1.3. Objetivos de la Investigación

1.3.1. Objetivo General

- Optimizar el tiempo de análisis de humedad por secado de las muestras de despacho de concentrado de cobre de Antapaccay.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar la influencia de la temperatura de secado en el tiempo de análisis de humedad por secado de las muestras de despacho de concentrado de cobre de Antapaccay.
- Determinar el peso de la muestra adecuado para el tiempo de análisis de humedad por secado de las muestras de despacho de concentrado de cobre de Antapaccay.
- Establecer la influencia de la pericia del analista en el tiempo de análisis de humedad por secado de las muestras de despacho de concentrado de cobre de Antapaccay.

Capítulo II

Marco Teórico

2.1. Antecedentes Internacionales

Organización Internacional de Normalización (2017) Ginebra, Suiza; en su norma ISO IEC 17025:2017 denominado: REQUISITOS GENERALES PARA LA COMPETENCIA DE LOS LABORATORIOS DE ENSAYO Y CALIBRACIÓN, nos especifica métodos básicos para el muestreo de concentrados de cobre, plomo, zinc y níquel de pulpas en movimiento y lotes de muestras sólidas estacionarias, incluye también el muestreo de fajas transportadoras para análisis químico, análisis del contenido de humedad de concentrados de cobre, también estudia si el concentrado es susceptible a oxidarse o sublimarse; es importante destacar que se requiere una muestra común para la determinación y el análisis del contenido de humedad, esta norma plantea los lineamientos y pasos para lograr obtener una muestra representativa para análisis de humedad, también a su vez indica los lineamientos para asegurar la confiabilidad en la operación de los laboratorios para que estos proporcionen resultados válidos y confiables, también obliga a que todo el personal debe ser constantemente capacitado y evaluado por competencia técnica poniendo énfasis en la importancia de la pericia del analista para asegurar la calidad de los resultados obtenidos y así lograr obtener resultados válidos y confiables.

2.2. Antecedentes Nacionales

Ortiz E. (2018) en Huancayo, Perú; realizó el trabajo de investigación denominado CINÉTICA DE SECADO, CARACTERIZACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL TIEMPO ÓPTIMO DE PULVERIZADO PARA UN

CONCENTRADO DE PLOMO, COBRE Y ZINC A NIVEL DE LABORATORIO, para lo cual realizó la caracterización del mineral en laboratorio, los minerales fueron plomo, cobre y zinc, seguidamente realizó la evaluación de cinética de secado de los mismos minerales y finalmente realizó la determinación en tiempo óptimo para el concentrado de mineral. Después de haber realizado la parte experimental se encontró que, en el caso de los concentrados de cobre, se observa que su masa aumenta durante el secado, lo que indica una tendencia de la muestra a oxidarse, lo que no se observa en el caso de los concentrados de plomo-zinc. La oxidación en muestras de concentrado de cobre se observa a simple vista como una capa bien delgada de varios colores en la superficie de los baños de secado. En el caso de los concentrados de plomo-zinc no se encontraron cambios significativos. En consecuencia, no se observó oxidación ni sublimación para este tipo de concentrado en relación con la masa original. En cuanto a la cinética de secado en el caso de la concentración de plomo y zinc, el resultado de la humedad del proceso determina 14 horas, el resultado de la humedad del proceso dentro de las 18 horas en comparación con el secado en la fase 2 son valores relativamente crueles, y con el tiempo. El problema y la eficiencia económica son las óptimas. Sin embargo, en el caso de la concentración, se encuentra que la masa de una muestra seca en la tercera etapa (18 horas) tiende a desarrollarse a partir del análisis de masa inicial de cada muestra, creando óxidos. De esta manera, este proceso tiene lugar en la que el proceso de secado no es continuo y los datos de prueba se registran determinando que el período de 14 horas es el más confiable, todo esto también se confirma controlando la temperatura censurada cada media hora en la

parte superior, en el medio y entre el nivel inferior del horno, realizado en cada proceso de principio a fin. (Ortiz, 2018).

Huacca M., (2019) en Arequipa, Perú, realizó el trabajo de investigación titulado MUESTREO DE CONCENTRADO EN EL ÁREA DE DESPACHO DE LA PLANTA CONCENTRADORA DE SULFUROS 1 PARA EL TRANSPORTE BIMODAL, para lo cual realizó la descripción de los equipos utilizados en la mina, así como de las zonas de operación. Después de haber realizado la parte metodológica se obtuvo que al implementar el transporte bimodal logra una rentabilidad mayor ya que se pueden transportar volúmenes de concentrado mayor. Por otro lado, el análisis de humedad es importante en el área de concentrado para ventas, logrando determinar el porcentaje de humedad promedio de 7 a 10% de humedad en el cual el concentrado no presenta fenómenos de licuefacción, se utilizó un analizador de humedad infrarrojo para determinar el porcentaje de humedad del concentrado de cobre por medio del secado infrarrojo, logrando determinar la humedad rápida en 30 minutos con un peso en gramos de 30g de muestra de concentrado. El muestreo manual estenopeico es adecuado para el muestreo probabilístico de muy bajo costo de grandes volúmenes de concentrados. La mejora continua de cada negocio se desarrolla e implementa cada vez más a través de un sistema de gestión integrado (Huacca, 2019).

Hallasi V., (2018) en Arequipa, Perú, realizó el trabajo de investigación titulado SECADO TÉRMICO DE CONCENTRADOS DE COBRE A NIVEL DE LABORATORIO, se utilizó el método termogravimétrico con secador infrarrojo para determinar el cálculo del contenido de humedad de los concentrados de cobre, para lo cual se tuvo que determinar la velocidad de secado, así como el contenido de humedad

durante el secado, se realizaron las pruebas experimentales con un peso de muestra de 5g y un intervalo de tiempo desecado de 3 minutos con una temperatura de secado de 65 C a 100 C, logrando este ultimo la mayor velocidad de secado, también se realizó la observación de caída de la velocidad de las muestras, después de haber realizado la parte experimental se encontró lo siguiente. La velocidad de secado está dispuesta de forma decreciente, esto se debe a la perdida de humedad en el tiempo ya que no es proporcional, por otro lado, el contenido de humedad decrece con respecto al tiempo de secado, es inversamente proporcional, es decir uno sube y la otra baja. Se pudo observar que para la muestra A, presenta una caída de velocidad menor que la muestra B; se pudo observar también que a mayor temperatura mayor velocidad de secado, esto se debe a que al elevar la temperatura aumenta la transferencia de calor al concentrado y por lo tanto la transferencia de masa, lo que quiere decir que la temperatura del concentrado aumenta, elevando la presión de vapor de agua de la muestra y conseguir un aumento de la velocidad de secado (Hallasi, 2018).

2.3. Bases Teóricas

2.3.1. Descripción del Proceso

Se analizará una descripción fundamental de la Planta Concentradora de Antapaccay y de cada una de sus áreas a funcionar como referencia para todos los trabajadores que operan en estos centros; así como también la descripción del Área de Control de Calidad en el despacho de concentrado de cobre; esta descripción se basa totalmente en diagramas de localización, diagramas de bloques funcionales, diagramas de bloques de entrada y salida, diagramas de Gestalt, en la Figura 1 se da a conocer la planta concentradora de Antapaccay.

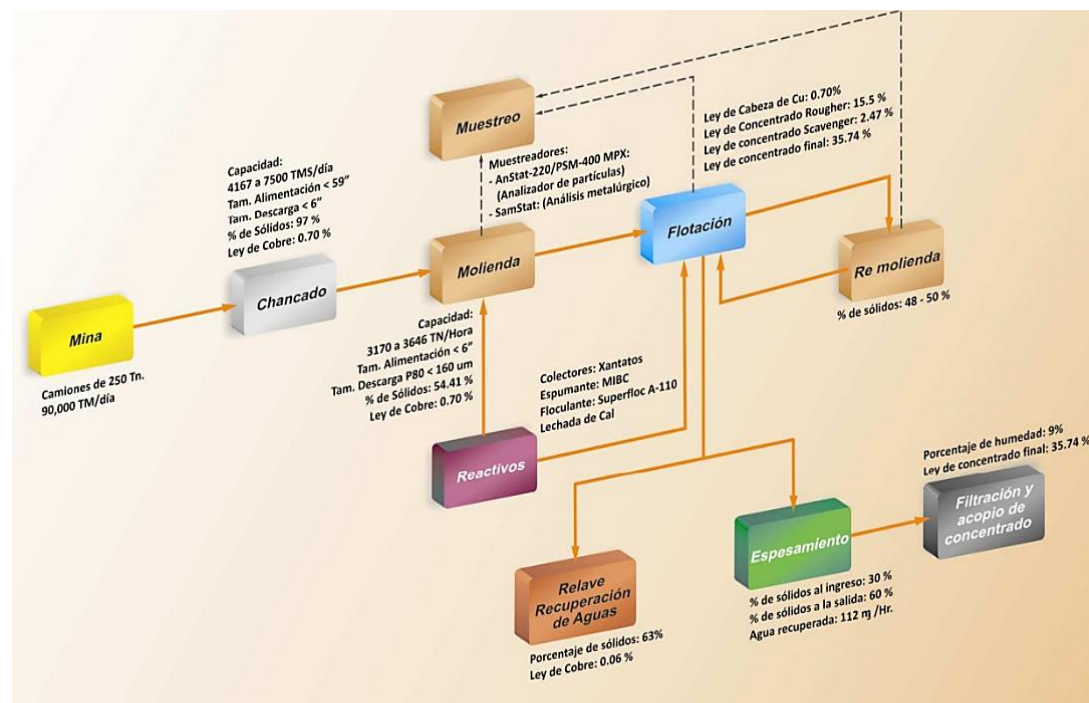
Figura 1*Planta concentradora Antapaccay***2.3.2. Descripción de las operaciones en Antapaccay**

Compañía Minera Antapaccay S.A. (2019) en su manual de operaciones nos comenta que el mineral procedente de la mina (mineral ROM) llega en vehículos de 250 toneladas al lugar de descarga de la chancadora número uno, donde los vehículos entregan una tolva de alimentación de 500 toneladas de capacidad. En la fase de trituración primaria, el mineral se reduce y se transporta a la trituradora de gruesos; pila de inventario, desde donde el mineral se alimenta con frecuencia al nivel de molienda. La molienda incluye perseverar y concluir el descuento del mineral, con el fin de desencajar los restos de mineral que se han recuperado. Se añade agua al proceso, lo que da lugar a una pulpa de material excelente, que se envía a la etapa siguiente; que es el sistema de flotación; este incluye la recuperación de un concentrado de cobre con un grado superior de 30% Cu y descartar los relaves (tejido estéril), después de lo cual se someten a los niveles de espesamiento y filtrado para su posterior comercialización. En la etapa de espesamiento se recupera el agua para el procedimiento y se descartan los relaves como tejido estéril para su posterior

comercialización, en la Figura 2 se observa todo del diagrama de áreas que comprende la planta concentradora de Antapaccay (p. 6).

Figura 2

Diagrama de áreas en la concentradora de Antapaccay



Nota: (Compañía Minera Antapaccay S.A., 2019, p. 5).

2.3.3. Aspectos Generales del Concentrado de Cobre y su Comercialización

2.3.3.1. Concentrado de Minerales.

LATIZA (2020) describe que el concentrado es un producto mineral que pasa por varios procesos para separar la mayor parte del mineral y recuperar el contenido valioso. Los concentrados reciben el nombre del mayor contenido de metal puesto que pueden ser concentrados de zinc, cobre, plomo y otros minerales. En tanto, podemos indicar que los concentrados contienen los principales metales, pero además del material restante, se le agregan otros elementos, que se convierten en elementos pagaderos y/o sancionables en las

negociaciones dependiendo de las condiciones de comercialización del comprador y vendedor (p. 3).

2.3.3.2. Caracterización de los Concentrados de Minerales.

En la tabla 1 se puede observar los principales elementos que componen los concentrados de los diferentes minerales y metales que existen.

Tabla 1

Principales componentes de los concentrados y concentraciones típicas promedio

Elemento	Símbolo	Unidad	Promedio
Cobre	Cu	%	22-25
Oro	Au	g/t	5-10
Plata	Ag	g/t	35-75
Hierro	Fe	%	31
Azufre	S	%	35
Antimonio	Sb	ppm	< 165
Arsénico	As	ppm	< 1000
Plomo	Pb	ppm	< 2100
Zinc	Zn	ppm	< 5400
Mercurio	Hg	ppm	< 1
Cadmio	Cd	ppm	< 50
Molibdeno	Mo	%	< 0.4
Alúmina	Al ₂ O ₃	%	< 3
Óxido de magnesio	MgO	%	< 0.4
No soluble		%	< 10

Nota: (LATIZA, 2020, pp. 17,18).

2.3.3.3. Concentrado de Cobre en Antapaccay.

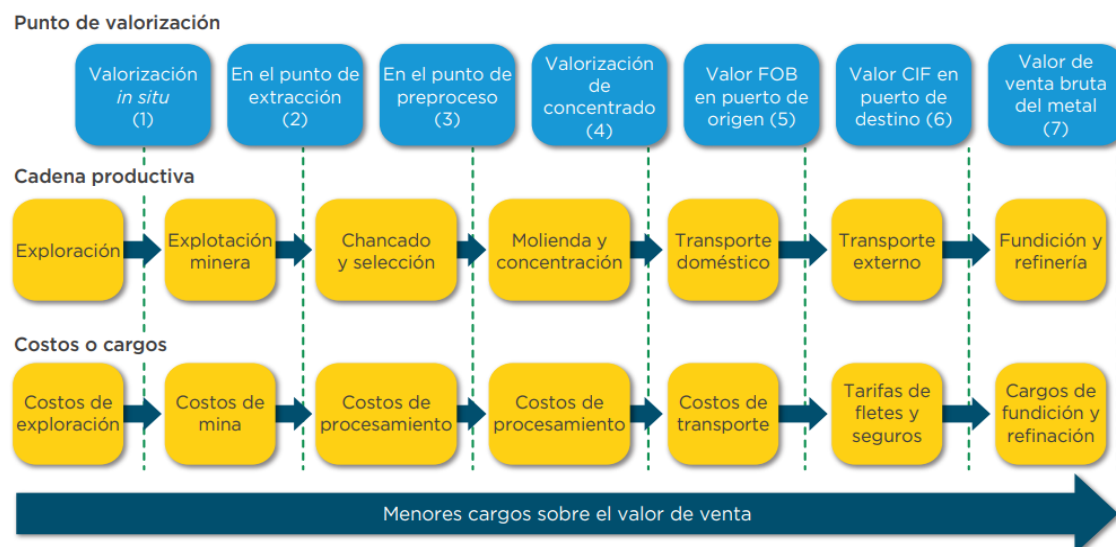
Compañía Minera Antapaccay S.A. (2019) indica que, el concentrado de cobre es un subproducto de la flotación de minerales y, a diferencia de los relaves y la alimentación de minerales, contiene grandes cantidades de cobre y pequeñas cantidades de otros metales. Para el caso de Antapaccay, el contenido de humedad del concentrado de cobre estuvo entre 6% y 13%, y la ley fue de 35,74%. Para lograr esta pureza, el mineral de cobre debe pasar por varias etapas de flotación y concentración. Finalmente, el concentrado se envía al puerto de Matarani para su posterior fusión (p. 7).

2.3.3.4. Aspectos de la Comercialización.

Reyes & Guajardo (2023) definen que, los concentrados no son un artículo normalizado de calidad homogénea que pueda considerarse como producto sin refinar, de forma similar a lo que ocurre con el cátodo de cobre. En definitiva, se trata de un resultado intermedio de calidad heterogénea. En este sentido, cada concentrado es excepcional y su valor debe determinarse de forma exclusiva. Además, este valor no es el producto de la cantidad de minerales que lo componen, y no hay que olvidar que la mayor parte de estos minerales tienen un valor comercial. Dado que se trata de un artículo intermedio, de la cantidad de minerales que tienen valor (pagadero) es importante deducir las etapas de manipulación que faltan para que el concentrado se convierta en resultado final. Por último, hay diferentes componentes que no se deducen ni se pagan, pero que también afectan al valor del concentrado, como es el caso del contenido de azufre, ya que determinados calentadores requieren una mayor o menor cantidad de este mineral, en la Figura 3 se da a conocer los puntos de valorización donde puede ocurrir la comercialización de un producto mineral (p. 14).

Figura 3

Punto de valorización donde puede ocurrir la venta de un producto mineral



Nota: (LATIZA, 2020, p. 16).

2.3.3.5. Determinación de la Calidad.

Reyes & Guajardo (2023) definen que, la determinación química de la calidad del concentrado de cobre puede establecerse decidiendo los componentes pagaderos y penalizables que es fundamental para fijar el valor. Un proceso de muestreo incorrecto, o una infravaloración intencionada de los componentes, puede hacer que el coste del artículo se desvíe fundamentalmente de su valor comercial real. En los intercambios entre agrupaciones autónomas, el exportador minero buscará continuamente ampliar la estimación del trato, lo que se compensa con el comprador, que intenta disminuir el gasto por la base concebible. De este modo, una práctica empresarial decente es que el comerciante solicite confirmaciones de calidad a una parte de los compradores de las organizaciones en cuestión o que implique a centros de investigación de estándares globales y acreditados para garantizar la franqueza durante el tiempo dedicado a decidir la calidad del concentrado de cobre (pp. 23,24).

2.3.3.6. Precios de los Metales.

Reyes & Guajardo (2023) comentan que, los compradores de concentrados deben aceptar que, como en cualquier ciclo moderno, hay mermas del producto final, por lo que la recuperación de cobre y metales valiosos no será del 100%. Por lo tanto, el comerciante y el comprador deben llegar a un acuerdo sobre las derivaciones metalúrgicas para cada metal pagadero, o, como tal, las cantidades de aquellos metales que no requieran ser pagados (p. 24). De esta manera, las principales derivaciones materiales son:

- Derivación porcentual: Las agrupaciones fijan el nivel del contenido del componente pagadero que debe asumir el comprador, que dependerá del componente y de su sustancia en el concentrado. Por ejemplo, en el caso del cobre, este porcentaje se sitúa en torno al 96,5%, pasando del 96% al 96,75%, pero con una derivación de base del 1%.
- Derivación en unidades porcentuales: Las agrupaciones establecen diversas unidades de tasa que no serán pagaderas y se deducirán de la ley del concentrado.

2.3.4. Despacho de Concentrado

Comprende las operaciones unitarias de carguío de los camiones con concentrado de cobre y muestreo con brazo robótico, con el fin de alcanzar una muestra representativa capaz de reflejar el contenido metálico y de humedad de todo el lote de concentrado de cobre, seguidamente, en la Figura 4 se observa el área de despacho de concentrado de cobre de Antapaccay.

Figura 4*Despacho de concentrado Antapaccay*

Nota: Figura tomada del área de despacho de concentrado, donde se puede apreciar el área de carguío y el almacén de concentrado de cobre en Antapaccay.

2.3.4.1. Descripción del Despacho de Concentrado de Cobre.

Control de Calidad Antapaccay (2021) indica que, en el área de despacho de concentrados se realizan los estudios pertinentes para garantizar la calidad del concentrado, por ejemplo, humedad, ley, peso y contenido de otros metales. Además, en esta sección se planifica la formación de rumas y descargas. El concentrado de Antapaccay presenta un promedio de 10 000 Toneladas de capacidad en el área de despacho con humedad de 9% y es transportado al puerto de Matarani, por donde se embarcan más de 4 millones de concentrado de mineral al año. El muestreo se realiza sobre el concentrado cargado en el camión que lo transporta, utilizando una sonda de muestreo que es accionada automáticamente por un brazo robótico, con un proceso de muestreo manual como plan de contingencia.

Las etapas del protocolo en el área de despacho de concentrados de Antapaccay son los siguientes:

- Primer pesaje (Tara) en la balanza de camiones
- Ingreso de camiones encapsulados (5 km/h a la playa de estacionamiento)
- Carguío de concentrado
- Segundo pesaje en balanza de despacho
- Nivelado del concentrado
- Muestreo de concentrado por brazo robótico
- Preparación mecánica de muestra de concentrado
- Secado de muestra de concentrado

En la Figura 5 se puede apreciar la zona de muestreo con brazo robótico del área de despacho de concentrados de cobre de la Compañía Minera Antapaccay.

Figura 5

Zona de muestreo Antapaccay



Control de Calidad Antapaccay (2021) comenta que, las muestras de concentrado de cobre obtenidas como resultado del muestreo planificado se envían para su procesamiento al

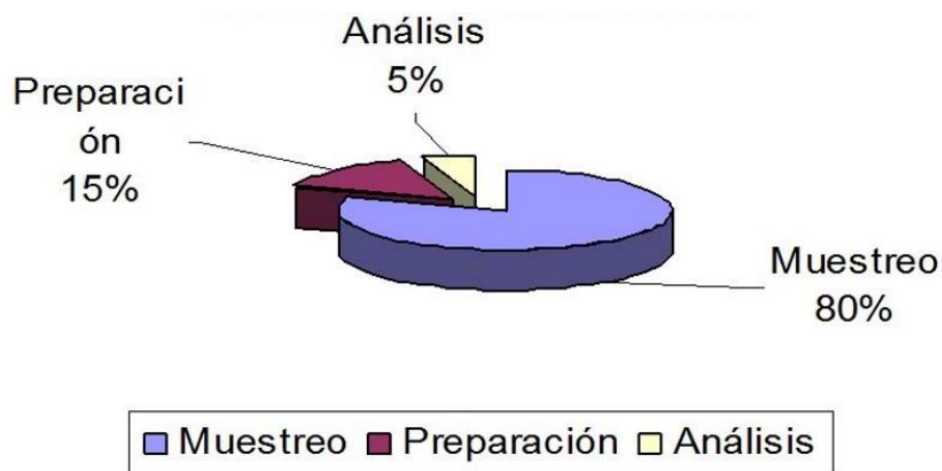
laboratorio de preparación de muestras, los aglomerados se homogenizan y dividen en el laboratorio, luego las muestras se dividen gradualmente para asegurar una muestra representativa de la siguiente manera: se agrega 20 incrementos a la bandeja A y otros 20 incrementos a la bandeja B para determinar la humedad por pérdida de peso durante el secado en hornos industriales. En la preparación de muestra para análisis químico se tomarán las muestras secas y se realizará un pre pulverizado de cada una, para luego compositar por lote de 10 camiones, y pulverizar nuevamente asegurando una granulometría no menor de 95% tamiz N°140 ASTM, luego en el divisor rotatorio obtener las porciones a ensobrar, la cual representará la muestra para análisis químico.

2.3.5. Muestreo

Perez, (2010) indica que el muestreo como el proceso de obtener información de solo un subconjunto de elementos en una población estadística (p. 3).

Lambert (2016) define que, el muestreo es el acto de retirar una porción de material cuyo valor se desea conocer. Esta parte o porción se denomina muestra y debe ser un dato representativo lo más cercano posible al total real con el grado de exactitud requerido. La exactitud requerida depende del número de muestras tomadas y de la calidad de las muestras; cuanto mayor sea el número, mayor será la exactitud que lograremos, pero también incrementara el costo de la operación (p. 12).

A continuación, en la Figura 6, se muestra la relevancia que tiene el muestreo en la toma de decisiones ya que el 80% de los errores en Laboratorio de Control de Calidad se da por un mal muestreo lo que conlleva a reportes sesgados de leyes y humedades de los concentrados, por lo que es primordial elegir el mejor tipo de muestreo para el proceso requerido.

Figura 6*Importancia del muestreo*

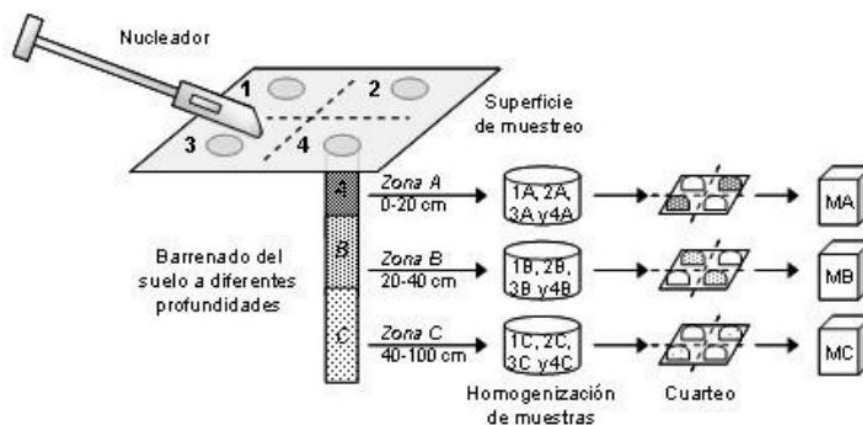
Nota: (Salazar, 2022, p. 9).

2.3.5.1. Muestreo Aleatorio Simple.

Salazar (2022) define que el muestreo aleatorio simple implica seleccionar segmentos o unidades de un lote M de modo que todas las muestras seleccionadas posibles de tamaño N tengan la misma posibilidad de ser seleccionadas (p. 9).

2.3.5.2. Muestreo Sistemático.

Salazar (2022) comenta que en este caso el muestreo se determina de acuerdo con reglas fijas como por ejemplo muestrear cada 15 minutos en una faja transportadora de concentrados de cobre; o también muestrear a diferentes profundidades (p. 10); como se observa en la siguiente Figura 7.

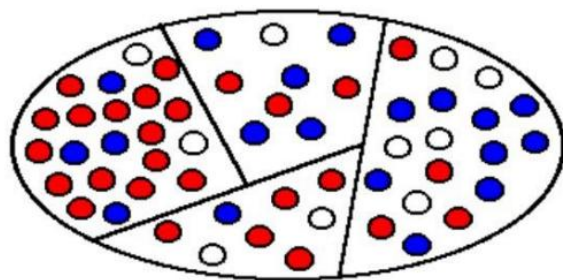
Figura 7*Muestreo sistemático a diferentes profundidades*

Nota: (Salazar, 2022, p. 10).

2.3.5.3. Muestreo Estratificado.

Salazar (2022) comenta que, en este tipo de muestreo, el lote M se divide en lotes o estratos, y luego se muestrea cada estrato de acuerdo con el procedimiento descrito anteriormente (p. 10).

En la siguiente Figura 8 se puede apreciar que un lote M se dividió en diferentes estratos, donde cada coloración represente a una diferente especie mineralógica.

Figura 8*Muestreo estratificado*

Nota: (Salazar, 2022, p. 10).

2.3.6. Muestreo de Concentrado

Control de Calidad Antapaccay (2021) indica que, la regla básica para la toma de muestras representativas es que cada componente del material a ser muestreado tiene la misma probabilidad de ser seleccionado y ser parte de la muestra final que se ensayó. Cualquier desviación de este requisito fundamental puede conducir en un sesgo.

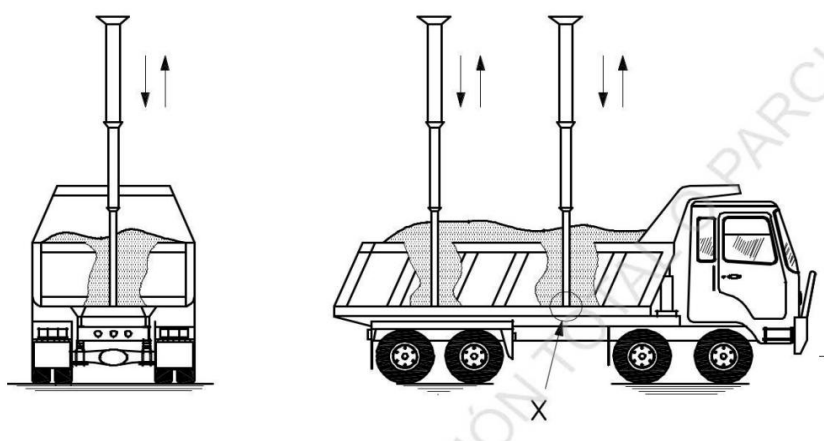
En el despacho de concentrados este muestreo es realizado por un brazo robótico capaz de extraer aproximadamente 15 kilogramos de muestra.

2.3.6.1. Muestreo Manual.

Ortiz (2018) define que, este método de muestreo es propenso a errores y solo es razonable durante temporadas irregulares o cortas cuando el material puede estar en un estado viscoso y difícil de procesar, de lo contrario se prefiere el muestreo automático, en la Figura 9 nos muestra el muestreo manual con sonda en camión de concentrado de cobre (p. 23).

Figura 9

Muestreo manual



Nota: (Instituto Nacional de Calidad INACAL, 2017, p. 54).

2.3.6.2. Muestreo en Sonda.

Ortiz (2018) define el muestreo en sonda como, es un tipo de muestreo manual denominado también Gun Samplers y vienen en varias formas para recolectar muestras, la más común es un tubo de medición variable con un extremo abierto y un extremo puntiagudo, el otro extremo conectado en forma de T, es decir. utilizado como manija de expulsión. La sonda tiene que ser lo suficientemente larga para alcanzar la base del mineral muestreado y debe insertarse perpendicular al punto de muestreo para obtener una sección representativa de la tubería para sacar y soltar la muestra con movimientos simples (pp. 24,25).

2.3.6.3. Muestreo Automático.

Ortiz (2018) indica que, en este tipo de muestreo, es más probable obtener reproducibilidad de los resultados además de obtener un número uniforme de muestras. El equipo de muestreo suele ser estacionario, en la línea de operación, con un mecanismo de muestreo que captura muestras de manera continua e intermitente como parte del material muestreado, En la Figura 10 se puede observar el muestreo automático con el Robot en operación tomando los 8 incrementos que conformarán la muestra de concentrado de cobre de dicho camión (p. 26).

Figura 10

Muestreo automático



2.3.7. Humedad del Concentrado

Ortiz (2018) define que, la humedad relativa afecta la composición de la muestra, así como la temperatura del ambiente durante el análisis, y para controlar estos cambios es una práctica constante eliminar la humedad de las muestras sólidas. La superficie de los minerales de concentrados de cobre suele contener agua en proporción con la atmósfera, que normalmente se puede excluir calentando la muestra o usando un desecador en un horno convencional. Deben secarse las muestras de este tipo hasta que el peso del material sea constante; estos procesos de secado toman muchas horas. Para disminuir el tiempo de secado, a menudo se usan hornos de circulación forzada y deben monitorearse para garantizar las condiciones de secado. Una alternativa al secado de muestras minerales antes del análisis químico es la

determinación de la humedad durante el análisis gravimétrico, que permite la evaluación y corrección de los resultados en seco (p. 36).

2.3.7.1. Formas de Agua en los Sólidos.

Ortiz (2018) describe que el agua esencial es agua que forma la estructura molecular o cristalina de compuestos sólidos que forman una cantidad estequiométrica de agua cuando se calientan o se descomponen. La cantidad de agua adsorbida se encuentra en los espaciadores sólidos en forma condensada. La cantidad de sólidos siempre depende mucho de la humedad y la temperatura. Otro tipo no esencial de humedad es el agua que se retiene como agua ocluida, esta agua líquida queda adherida en todos los huecos microscópicos a lo largo del cristal sólido que forma parte del mineral o como modelo de objeto por estructura. Estos vacíos se encuentran comúnmente en minerales y rocas, además de los que ocurren en los sedimentos de gravedad (p. 37).

2.3.7.2. Efecto de la Temperatura y la Humedad en el Concentrado de Cobre.

Según Ortiz (2018) indica que, la concentración de agua en los sólidos siempre disminuye al aumentar la temperatura y disminuir la humedad. Todos los impactos actuales varían mucho en velocidad y magnitud según el tipo de retención de agua. La humedad relativa y la temperatura de una muestra con mucha agua determinan su composición química. El cloruro de bario anhidro, que es higroscópico y absorbe agua del medio ambiente para formar uno de los dos hidratos estables, que también existen según la humedad relativa y la temperatura del sistema, es uno de los ejemplos. En los compuestos que contienen agua absorbida, la cantidad de agua disminuye a medida que aumenta la temperatura del concentrado, y cuando el concentrado alcanza temperaturas superiores a 100 °C, que es la temperatura del punto de

ebullición del agua, generalmente llega a cero. Casi siempre, la absorción o desorción del contenido de humedad es rápida, y el equilibrio se alcanza en 5 o 10 minutos (pp. 38,39). Como indica Ortiz (2018) que el contenido de humedad de las muestras después de la adsorción de agua varía significativamente debido a las condiciones atmosféricas. Por el contrario, la desorción del agua adsorbida puede llevar días o semanas hasta que el equilibrio a temperatura ambiente vuelva a ser estable. El agua absorbida generalmente es solo unas décimas de la masa de la muestra; de lo contrario, puede ser 10% al 20%. Por lo tanto, las muestras que absorben agua no siempre están en equilibrio con la atmosfera, lo que las hace sensibles a los cambios de humedad. A medida que aumenta la temperatura de un sólido que ha absorbido agua, su superficie vaporizada se expande gradualmente. A veces, el aumento de temperatura se combina con el colapso, cuando los cristales sólidos estallan repentinamente debido a la presión de vapor creada por la humedad en la cavidad interior de la partícula de muestra (pp. 38,39).

2.3.8. *Embarque del Concentrado de Cobre, Peligros de Licuefacción*

El concentrado de cobre es embarcado en los diferentes puertos de nuestro país, como es el caso del puerto Matarani de donde se embarca el producto final de las más importantes minas en el Perú. El concentrado de cobre al ser un material con cierta cantidad de humedad, durante su transporte tiende a ganar o perder humedad, esto debido a las condiciones ambientales a las que es sometido el concentrado durante su transporte rumbo al puerto de Matarani; en ambos casos hay que tener en cuenta dicho incremento o reducción de la humedad y tener bien mapeado dichos cambios físicos que se somete el concentrado de cobre durante su transporte.

2.3.8.1. Peligros Durante el Embarque.

Convenio SOLAS (2008) en su seccion 7 indica que, las cargas concentradas pueden transportarse en un estado granular relativamente seco, pero se humedecen lo suficiente como para licuarse durante el tránsito debido a la compactación y la vibración; el movimiento de la carga debido al movimiento que genera el barco puede ser suficiente para hundirlo. La transferencia de carga se puede dividir en dos tipos: colapso por deslizamiento de tierra y licuefacción. Por lo tanto, el control de calidad y el análisis de humedad durante el transporte del concentrado de cobre son cruciales (p. 35).

2.3.8.2. Licuefacción del Concentrado de Cobre.

Convenio SOLAS (2008) definen que las cargas de concentrado de cobre que contienen con un determinado porcentaje de partículas pequeñas y un determinado contenido de humedad; pueden separarse el sólido del líquido (licuefacción), inclusive cuando la carga está bien nivelada. La licuefacción puede mover la carga. Este fenómeno se puede describir de la siguiente manera: el volumen entre los espacios de las partículas de concentrado se reduce y la carga se comprime entre sí, lo que provoca un aumento de la presión en el agua y la liberación de esta agua en forma líquida (p. 36).

La licuefacción no se dará cuando se cumpla una de las siguientes condiciones:

- La cohesión entre las partículas en la carga restringirá su desplazamiento y no incrementara la presión del agua en los espacios entre las partículas de la carga porque la carga tiene un tamaño de partícula muy pequeña.
- Las cargas que están formadas por partículas o grumos de gran tamaño no se licuarán porque el agua se mueve a través de los espacios entre las partículas sin aumentar su presión.

- La carga tiene un bajo porcentaje de humedad y un alto porcentaje de aire. Como resultado, la carga relativamente seca no puede licuarse.

Cuando el contenido de humedad supera el límite de humedad de transporte (THL), puede ocurrir una deflexión de la carga debido a la licuefacción. Incluso si el contenido de humedad de la carga está por debajo del THL, la migración de humedad puede ocurrir con algunas cargas, lo que puede crear una base húmeda peligrosa. Aunque la superficie puede parecer seca, la carga puede licuarse accidentalmente y causar deflexión. La carga con un alto contenido de agua es propensa a resbalar, especialmente en aguas poco profundas y en ángulos pronunciados.

En el estado viscoso así creado, se puede dar que, debido al balanceo, la carga se deslice hacia un costado del buque, y cuando el otro costado se balancea en sentido contrario, la carga no vuelve completamente a su posición original. Por lo tanto, el barco puede llegar gradualmente a una posición peligrosa y volcar muy rápidamente.

Debido a esto las cargas de concentrado solo son aceptadas para su embarque siempre y cuando su contenido de humedad sea menor a su THL.

2.3.9. *Presión del Vapor*

Ceballos (2020) define la presión de vapor llamado también más comúnmente presión de saturación es la presión a la que a cada temperatura las fases líquida y vapor se encuentran en equilibrio, su valor es independiente de las cantidades de líquido y vapor presentes mientras existan ambas. En la situación de equilibrio, las fases reciben la denominación de líquido y vapor saturados (p. 8).

2.3.9.1. Humedad Relativa.

El autor Ceballos, (2020) comenta que la humedad relativa (h) se refiere a la cantidad de humedad presente en una muestra de aire determinada en comparación con la cantidad de humedad presente en aire completamente saturado a la misma temperatura. La humedad relativa se expresa como porcentaje, como 50%, 75%, 30%, etc. (p. 7)

2.3.9.2. Humedad Absoluta.

Ceballos, (2020) comenta que la humedad absoluta (ha) se refiere al peso de vapor de agua por unidad de volumen. Esta unidad de volumen suele ser un metro cúbico (o pie cúbico) de espacio. Este espacio suele contener también aire, pero no necesariamente. La humedad relativa se basa en la humedad absoluta bajo ciertas condiciones, es decir, La humedad relativa es una comparación de la humedad absoluta a la misma temperatura cuando está saturada con vapor de agua (p.6).

Tanto la humedad absoluta, como la relativa, están basadas en el peso del vapor de agua en un volumen dado.

2.3.10. Transferencia de calor

2.3.10.1. Transferencia de calor por conducción.

Según los autores McCabe, Smith, & Harriot (2007) la transferencia de calor por conducción es el producto de interacciones moleculares. Las moléculas de un objeto que está a una temperatura más alta vibran con mayor rapidez, estas chocan con las moléculas menos energéticas situadas en la parte de menor temperatura del objeto. Como resultado del choque las moléculas que se mueven a mayor velocidad transfieren una parte de su energía a las que se mueven más despacio. De esta forma se dice que la transferencia de calor por conducción

siempre se da de una región con temperatura más alta hacia una región con temperatura más baja. Se trata de una transferencia como resultado de una diferencia de temperaturas (p. 311).

2.3.10.2. Transferencia de calor por convección.

McCabe, Smith, & Harriot (2007) comentan que la transferencia de calor por convección consiste en dos mecanismos los cuales operan simultáneamente. El primer mecanismo es debido al movimiento molecular, el mismo que en la transferencia debido a conducción. El segundo mecanismo es de la transferencia de energía debido al movimiento macroscópico de “paquetes” del fluido. El movimiento del fluido es el resultado de paquetes de líquido, cada uno de los cuales consiste en un gran número de moléculas, que se mueven en virtud de una fuerza externa. Esta fuerza extraña puede deberse a un gradiente de densidad, como en la convección natural, o debido a una diferencia de presión generada por una bomba o un ventilador, o posiblemente a una combinación de los dos. La transferencia de calor por convección depende de la densidad, viscosidad y velocidad del fluido, así como de sus propiedades térmicas (calor específico y conductividad térmica).

Por otro lado, si el fluido circula impulsado por un ventilador o bomba, el proceso se llama convección forzada; si el flujo se debe a diferencias de densidad causadas por expansión térmica, como el ascenso de aire caliente, el proceso se llama convección natural (p. 312).

2.3.10.3. Transferencia de calor por radiación.

Según los autores McCabe, Smith, & Harriot (2007) la radiación es la transferencia de calor por ondas electromagnéticas como la luz visible, el infrarrojo y la radiación ultravioleta. La tasa de radiación de energía de una superficie es proporcional a su área superficial A , y aumenta rápidamente con la temperatura T , según la cuarta potencia de la temperatura absoluta en grados Kelvin (p. 312).

2.3.11. Principios Básicos del Secado

McCabe, Smith, & Harriot (2007) comenta que generalmente, el secado de sólidos implica eliminar pequeñas cantidades de agua u otros líquidos de los materiales sólidos para reducir el contenido de líquido residual a un valor aceptablemente bajo. El secado suele ser el último paso de una serie de pasos y el producto que se retira de la secadora suele estar listo para ser envasado. Los sólidos secos se presentan en muchas formas (escamas, gránulos, cristales, polvos, láminas o láminas continuas) y tienen propiedades muy diferentes. El líquido a evaporar puede estar en la superficie del sólido, como en el caso de secar cristales de sal, o completamente dentro del sólido, como en el caso de la eliminación de disolvente de una lámina de polímero, o parcialmente afuera y parcialmente adentro. La alimentación de algunos secadores es un líquido con sólidos suspendidos en forma de partículas o en solución. El producto a secar puede estar expuesto a altas temperaturas o puede requerir un manejo suave a temperaturas bajas o medias. Como resultado, existe una amplia variedad de secadoras comerciales disponibles en el mercado. La diferencia está principalmente en cómo se mueven los sólidos a través de la zona de secado y cómo se transfiere el calor (p. 833).

2.3.12. Clasificación de Secadores

McCabe, Smith, & Harriot (2007) indican que no existe una manera sencilla de clasificar los equipos de secado. Algunas secadoras funcionan de forma continua mientras que otras funcionan de forma intermitente o intermitente, algunas mantienen los sólidos agitados mientras que otras no. Se puede utilizar la operación de vacío para reducir la temperatura de secado. Algunas secadoras pueden manejar cualquier tipo de

material, mientras que otras están limitadas por el tipo de alimento que pueden aceptar (p. 833)

Los equipos de secado se clasifican en:

- Secadoras donde los sólidos están expuestos directamente a gases calientes (normalmente aire).

- Secados en los que se transfiere calor al sólido desde un medio externo (como vapor de agua condensado), generalmente a través de una superficie metálica en contacto con el sólido.

- Secadores calentados por energía dieléctrica, radiante o microondas.

Según los autores McCabe, Smith, & Harriot (2007) los secadores que exponen sólidos a gases calientes se denominan secadores directos o secadores adiabáticos.

Algunas plantas combinan secado adiabático y no adiabático y se denominan secadores indirectos directos. Algunos dispositivos tienen más de un portador de calor, como gas caliente y una superficie calefactora o gas caliente y radiación (p. 843).

2.3.13. Tratamiento de Sólidos en los Secadores

McCabe, Smith, & Harriot (2007) comentan que algunos secadores industriales secan piezas grandes, como láminas de polímero o vasijas de cerámica, pero la mayoría trabajan con partículas de sólidos durante todo el ciclo de secado o una parte de él (p. 834)

En un secador adiabático, en algunos secadores los sólidos están expuestos a los gases. De estas maneras:

- Circulación de gas sobre una capa sólida o superficie de una capa sólida o de una capa o película continua por una o ambas caras. Este proceso se llama secado. Circulación lateral (véase Figura 11a).

- El gas circula a través de un lecho de sólidos de grano grueso sostenido sobre una pantalla. Este proceso se llama secado por circulación fija. Al igual que con el secado por circulación cruzada, la velocidad del gas se mantiene baja para evitar el arrastre de sólidos (véase Figura 11b).

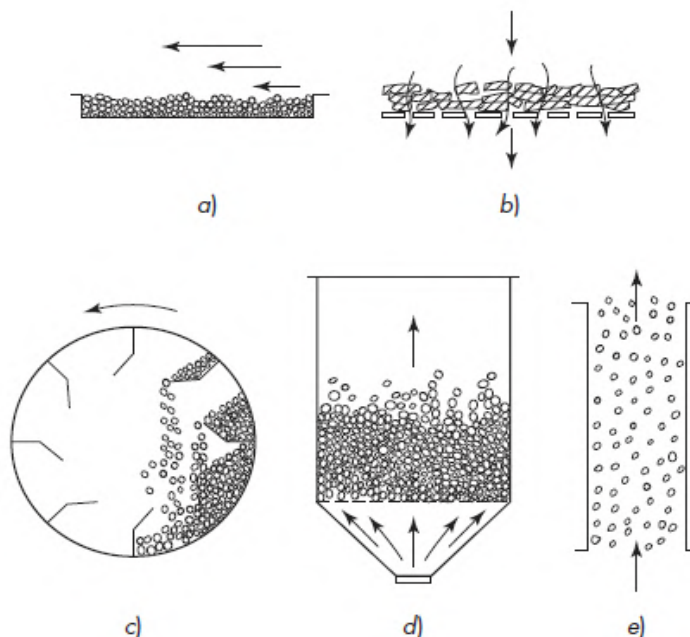
- Los sólidos caen a través de las corrientes de aire en forma de lluvia. Se mueve lentamente, lo que a menudo provoca un arrastre innecesario de pequeñas partículas en un gas (véase Figura 11c).

- El gas pasa a través de los sólidos a una velocidad suficiente para fluidificar el lecho. La penetración de partículas finas es inevitable (véase Figura 11d).

- Los sólidos se eliminan por completo mediante el flujo de gas de alta velocidad y se transportan neumáticamente desde el mezclador al separador mecánico (véase Figura 11e).

Figura 11

Modelos de interacción gas-sólido en los secadores.



Nota: (McCabe, Smith, & Harriot, 2007, p. 835) *de la figura se puede apreciar que:* a) flujo de gas sobre un lecho estático de sólidos; b) flujo de gas a través de un lecho de sólidos preformados; c) acción de lluvia en un secador rotatorio; d) lecho fluidizado de sólidos; e) flujo en paralelo gas-sólido en un secador súbito de transporte neumático.

2.3.14. Hornos de Secado

CROMTEK (2020) en su página web definen que: los hornos de secado se utilizan en laboratorios para calentar materiales y eliminar su contenido de humedad. Se usa comúnmente en situaciones donde se requiere un proceso de secado preliminar, como en las industria minera, agrícola, farmacéutica y otras. Este horno acelera el proceso de secado, creando condiciones óptimas para la evaporación. Usando un horno de aire caliente, el material se seca por convección, que hace circular el aire alrededor de la muestra. Este tipo de secado es eficaz y eficiente para un gran número

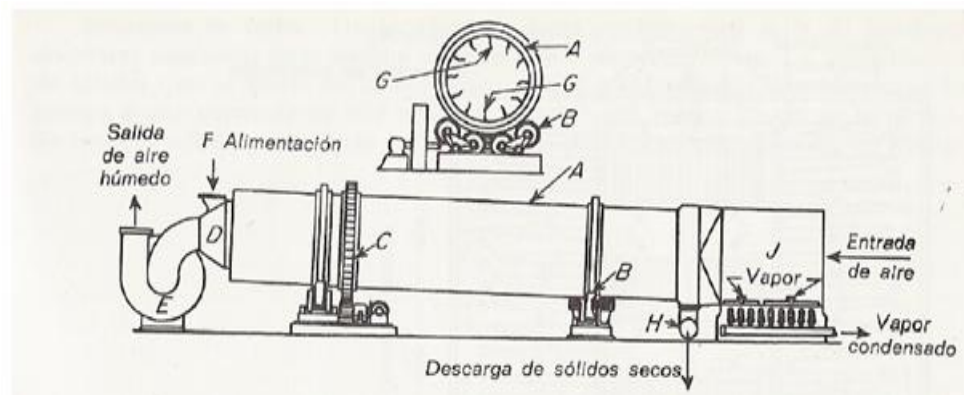
de muestras. Un horno de secado utiliza calor para eliminar la humedad de la muestra antes de que salga de la máquina. El dispositivo es particularmente adecuado para secar muestras que son sensibles al daño por humedad, como componentes electrónicos o químicos. También eliminan la humedad de los alimentos para prolongar su vida útil. Algunos hornos están equipados con deshumidificadores que ayudan a reducir aún más la humedad relativa dentro de la unidad. Si la humedad es baja, el proceso de secado puede proceder más rápido y de manera más eficiente.

2.3.14.1. Tipos de Hornos de Secado.

2.3.14.1.1. De Secado Rotatorio.

Power Tronic (2021) comenta que a menudo se utilizan en la industria del metal porque proporcionan tiempos de secado más rápidos sin oxidación. Estos secadores a menudo están diseñados para ser energéticamente eficientes y pueden combinarse con otros procesos, lo que reduce los costos operativos.

De manera general, un secador rotativo consta de un cilindro hueco que gira sobre su eje y está ligeramente inclinado para deslizar el sólido a secar hacia la salida. Se pasan por la entrada y el gas caliente se libera por la salida, lo que secará a contracorriente los sólidos, que se deslizan lentamente hacia la salida durante el secado. El método de calentamiento es el contacto indirecto a través de la pared del cilindro y se calienta a través de un paso de gas. A medida que las partículas se deslizan sobre secciones relativamente cortas, su contenido de humedad disminuye. La mayoría de las veces es costoso.

Figura 12*Horno de secado rotatorio*

Nota: (Ceballos, 2020, p. 11)

2.3.14.1.2. Horno de Secado de Lecho Fluidizado.

Power Tronic (2021) comenta que estos secadores son de flujo de gas continuo y pasa a través de una membrana que no permite que los sólidos pasen, este medio está diseñado para una transferencia de calor rápida.

2.3.14.1.3. De Secado al Vacío.

Power Tronic (2021) define estos equipos versátiles que se usan de manera primordial en ingeniería, investigación y otras industrias donde puede ser necesario el secado en un entorno de baja presión. Este horno minimiza la oxidación e incluso puede incluir una interfaz digital automatizada para propósitos de monitoreo.

2.3.14.1.4. Secadoras Transportadoras.

Power Tronic (2021) comenta que estos secadores de faja transportadora se utilizan en procesos que necesiten una producción continua de productos pequeños y medianos. Estas son la mejor opción si su fábrica utiliza producción en masa automatizada, ya que encajan bien en la mayoría de las líneas de producción.

2.3.14.1.5. De secado por Convección.

Power Tronic (2021) define que este tipo de horno se basa en altas temperaturas para apresurar lentamente el proceso de deshidratación. Estos kits son una excelente opción para precalentar, fermentar, hornear, esterilizar y almacenar térmicamente.

2.3.14.1.6. De Secado por Aire Forzado.

Los hornos de convección como se muestra en la Figura 13 tienen ventiladores en las paredes del horno que hacen que circule aire caliente a través del horno. El sistema de circulación de aire forzado garantiza una rápida recuperación del calor y una excelente uniformidad de la temperatura.

Figura 13

Horno de secado por aire forzado



2.3.14.1.7. De Secado por Gravedad.

Power Tronic (2021) comenta que mas que otros tipos de hornos de convección mecánica, están diseñados para aplicaciones que requieren una uniformidad de temperatura. Muchas aplicaciones industriales, como el secado y la cocción, requieren hornos de convección por

gravedad. Cada horno cuenta con un suministro de aire natural por convección a través de estantes perforados para garantizar temperaturas uniformes sin ventiladores.

2.3.14.1.8. Hornos Básicos de Secado de Doble Pared.

Power Tronic (2021) define un horno básico de este tipo no difiere mucho de los hornos que se usan en las cocinas caseras. Proporciona un mayor grado de uniformidad, control de temperatura, capacidad de secado rápido.

2.3.14.1.9. Secadoras de Banda.

Power Tronic (2021) comenta que estos hornos son usados para recubrimientos de tela, empaques y fabricación de textiles. El secado de la banda de flotación y soporte de rollo generalmente presenta un flujo de aire estable y un control de temperatura preciso, lo que resulta en una eficiencia general mejorada.

2.3.14.1.10. Secadoras Verticales de Torre.

Power Tronic (2021) afirma que estos hornos son ideales para espacios donde falta espacio para salas grandes, ya que optimizan el aprovechamiento del espacio añadiendo a su funcionamiento hornos industriales de secado. Esto ayuda a reducir los costos generales al tiempo que mejora la calidad y el tiempo de respuesta.

2.3.15. Secado del Concentrado

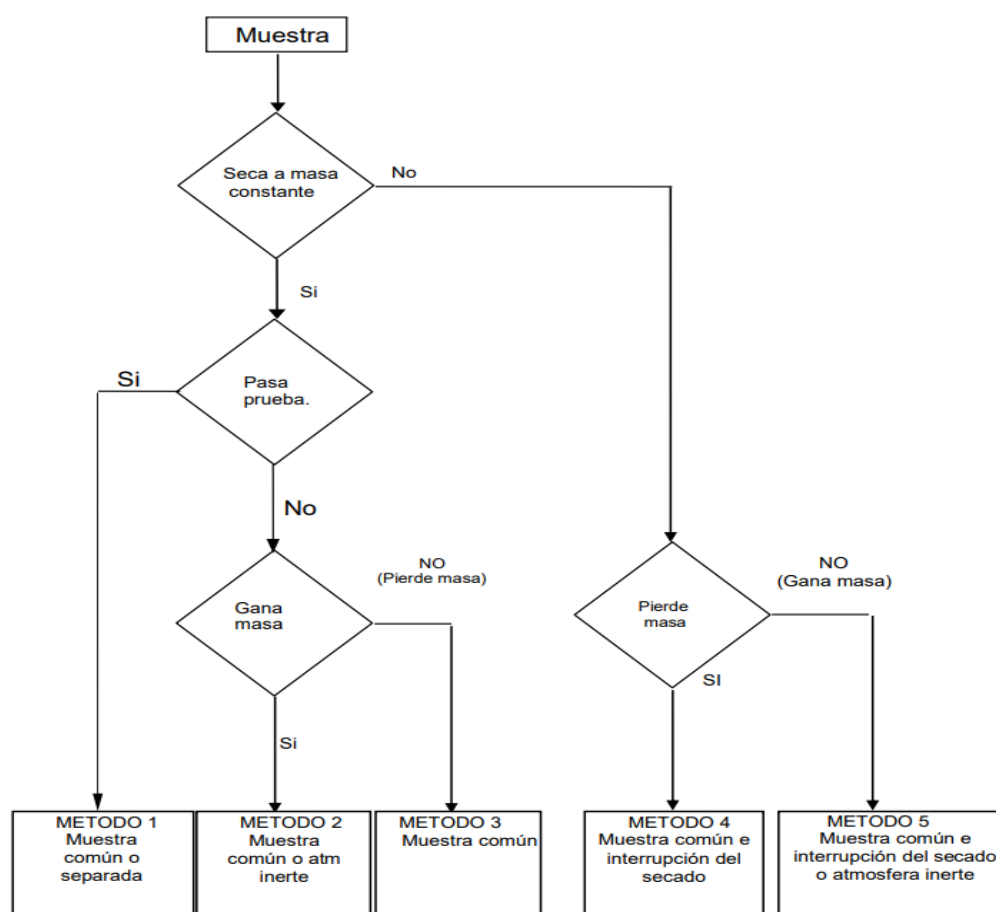
Instituto Nacional de la Calidad INACAL (2016) indica que las muestras a ensayar deben ser secadas hasta cumplir con la condición de peso constante y el porcentaje de humedad se determina como el porcentaje de pérdida de peso durante la operación de secado. No obstante, la operación de secar y cumplir con la condición de peso constante podría ser intrincado o no sería posible si el concentrado tiende a sublimarse u oxidarse (p. 4).

En Antapaccay el secado del concentrado se realiza en hornos industriales, donde se colocan racks llenos de bandejas A y B (duplicados) donde cada bandeja representa una muestra de un camión.

A continuación, en la Figura 14, se indica el método de secado correcto según el tipo de secado que se requiera.

Figura 14

Diagrama para seleccionar el método de secado correcto



Nota: (Instituto Nacional de la Calidad INACAL, 2016, p. 5).

2.3.15.1. Susceptibilidad de Oxidación y Sublimación del Concentrado.

Algunas muestras pueden ser susceptibles a estas interferencias, una forma rápida de determinar si el concentrado se oxida o sublima es que si el concentrado tiende a ganar peso

este podría estar oxidándose, mientras que si el concentrado pierde peso es que esta liberando azufre y por lo tanto estaría sublimándose y se tiene que determinar con el siguiente calculo para su verificación en ambos casos:

Según Instituto Nacional de la Calidad INACAL (2016) indica que se debe pesar el peso seco m_3 y calcular el peso perdido frente el peso bruto húmedo m_2 y añadirle una cantidad de agua que sea similar a esta diferencial de peso (pérdida de peso de $m_2 - m_3$) y volverlo a secar en el horno, una vez pasado el tiempo de secado determinado volver a pesar dicha muestra reseca m_4 y realizar los siguientes cálculos (p. 15).

- El concentrado es susceptible a oxidarse si:

$$m_4 - m_3 > \frac{m_2 - m_1}{2000} \quad (1)$$

- El concentrado es susceptible a sublimarse si:

$$m_3 - m_4 > \frac{m_2 - m_1}{2000} \quad (2)$$

Donde:

m_1 : Peso tara

m_2 : Peso bruto húmedo

m_3 : Peso bruto seco

m_4 : Peso bruto seco constante

2.3.16. Cinética de secado

La cinetica de secado de un material, en este caso el concentrado de cobre, relaciona la variacion del contenido de agua del concentrado y la intensidad de la

evaporación de la misma en función del tiempo, en otras palabras estudia la velocidad con la que el agua es liberada en función del tiempo.

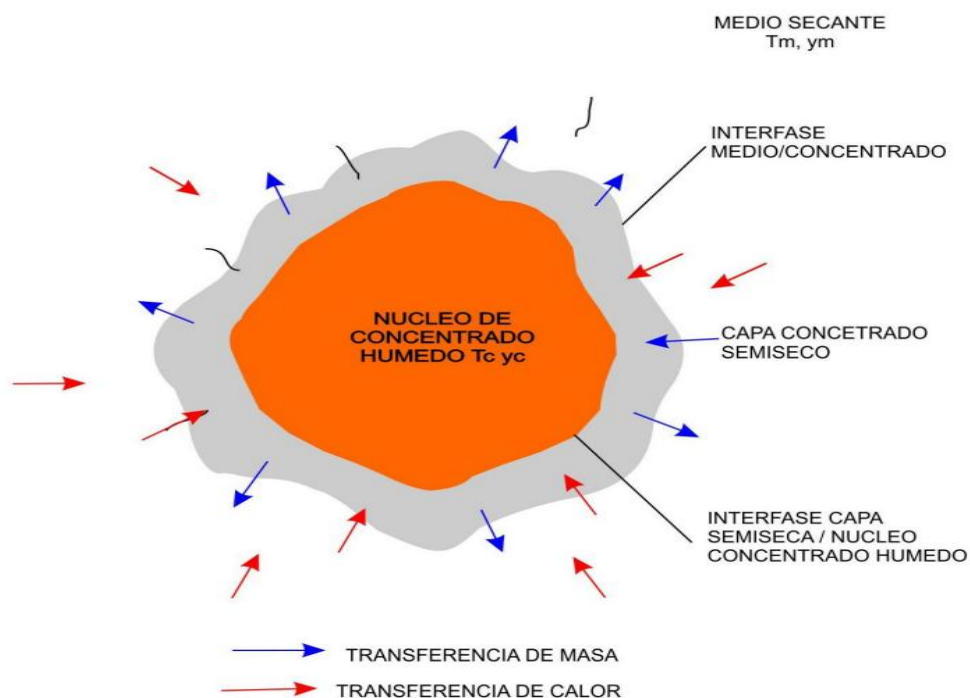
Hallasi (2018) indica que, el secado térmico del concentrado no es instantáneo, sino un proceso dinámico en el que los procesos de transferencia de masa y calor ocurren simultáneamente. El concentrado debe recibir calor del medio de secado (secado directo) y liberar algo o toda la humedad (p. 32).

Hallasi (2018) comenta que los concentrados húmedos tienen una alta tendencia a aglomerarse, por lo que el modelo que se muestra en la Figura 15 es adecuado para casi todos los casos. El modelo representa la aglomeración del concentrado húmedo. Los aglomerados tienen temperatura T_c y humedad Y_c , en un momento dado, se encuentra con un ambiente seco con temperatura T_m y humedad Y_m . Suponiendo que se haya formado una capa de concentrado semiseco dentro del tiempo considerado, el secado se producirá de acuerdo con los siguientes mecanismos de transferencia de masa y calor (p. 34).

- Transporte de calor entre medio y la interfase.
- Transporte de calor en la interfase m/c.
- Transporte de calor en la capa semiseca.
- Evaporación del agua líquida en algún punto de la capa semiseca.
- Difusión de agua líquida hasta el punto en que se evapora.
- Difusión del vapor de agua hasta la interfase m/c.
- Difusión del vapor de agua a través de la interfase m/c.
- Transporte del vapor al medio secante.

Figura 15

Modelo cinético del secado térmico de un aglomerado de partícula de concentrado de cobre



Nota: (Hallasi, 2014, p. 35).

2.3.16.1. Velocidad de Secado.

La velocidad en la que se evapora el agua del concentrado puede definirse como la gradiente de humedad y el coeficiente de masa en función de la gradiente del tiempo, la velocidad de secado se evalúa mediante la siguiente ecuación (3) :

$$V = \frac{\Delta X}{\Delta T} \quad (3)$$

Donde:

V: Velocidad de secado en funcion del peso.

ΔX : Variación de humedad en base seca (g H₂O/g p.s.)

ΔT : Tiempo de secado (h)

El cálculo del contenido de humedad en base húmeda se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$M = \frac{mh - ms}{mh} * 100 \quad (4)$$

Donde:

M: Contenido de humedad en base húmeda (%)

mh: masa del producto húmedo (g)

ms: masa del producto seco (g)

El cálculo del contenido de humedad inicial en base húmeda se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Mi = \frac{mhi - ms}{mh} \quad (5)$$

Donde:

Mi: Contenido de humedad inicial en base húmeda (%)

mhi: masa inicial del producto húmedo

El cálculo del contenido de humedad final en base húmeda se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Mf = \frac{mhf - ms}{mh} \quad (6)$$

Donde:

Mf: Contenido de humedad final en base húmeda (%)

mhf: Masa final del producto húmedo

El cálculo del contenido de humedad en base seca se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$X = \frac{mh - ms}{ms} \text{ ó } X = \frac{M}{(1 - M)} \quad (7)$$

Donde:

X: Contenido de humedad en base seca (g H₂O / g p.s)

El cálculo del contenido de humedad inicial en base seca se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Xi = \frac{mhi - ms}{ms} \text{ ó } Xi = \frac{Mi}{(1 - Mi)} \quad (8)$$

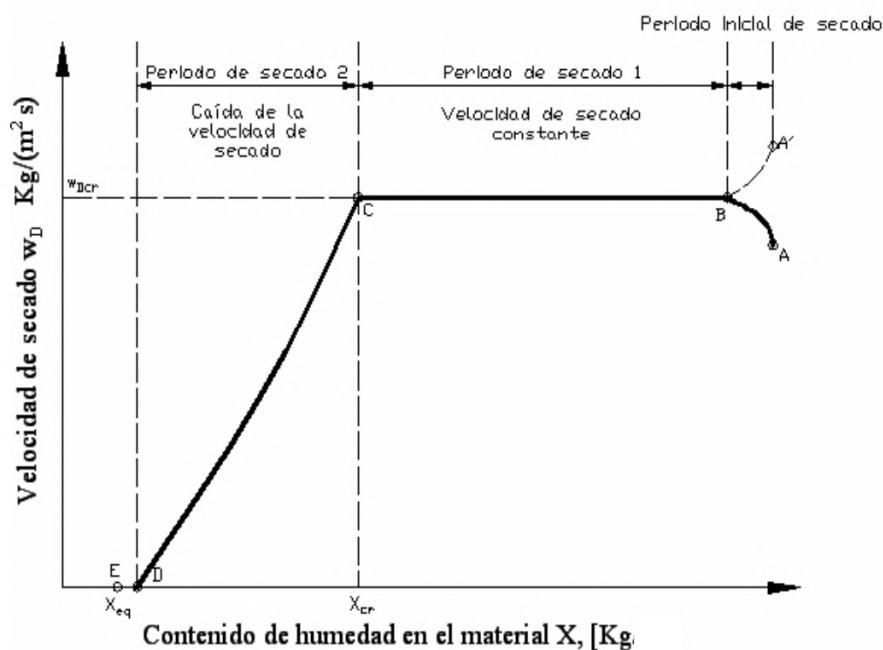
El cálculo del contenido de humedad final en base seca se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Xf = \frac{mhf - ms}{ms} \text{ ó } Xf = \frac{Mf}{(1 - Mf)} \quad (9)$$

A partir de las ecuaciones (8) y (9) la variación de humedad en base seca se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta X = [Xf - Xi] \quad (10)$$

La velocidad de secado tiene 2 periodos, el primer periodo es la velocidad de secado constante y el segundo periodo es la caída de la velocidad de secado, por lo tanto se afirma que la velocidad de secado de los concentrados de cobre tiene un orden de reacción mixto, como se muestra en la Figura 16.

Figura 16*Curva de velocidad de secado*

Nota: (Ortiz, 2018, p. 31).

2.3.16.1.1. Periodo de Velocidad de Secado Constante.

Ortiz (2018) comenta que en el periodo inicial la superficie del material permanece cubierta con una delgada capa de líquido la que usualmente es secada como humedad desatada, libre o capilar también indica que en este periodo la velocidad de secado permanece constante como se muestra en la Figura 16 así como la intensidad de evaporación en la superficie del concentrado de cobre, debido a que el movimiento del agua al interior del sólido es suficiente para compensar la pérdida de agua en la superficie del concentrado (p. 32).

2.3.16.1.2. Periodo de Caída de la Velocidad de Secado.

Ortiz (2018) comenta que esta fase de disminución del secado puede tener un comportamiento lineal como se muestra en la Figura 16 y también puede ocurrir de forma no lineal, lo que requiere un estudio más detallado de la tendencia de la curva de secado. La forma de la curva

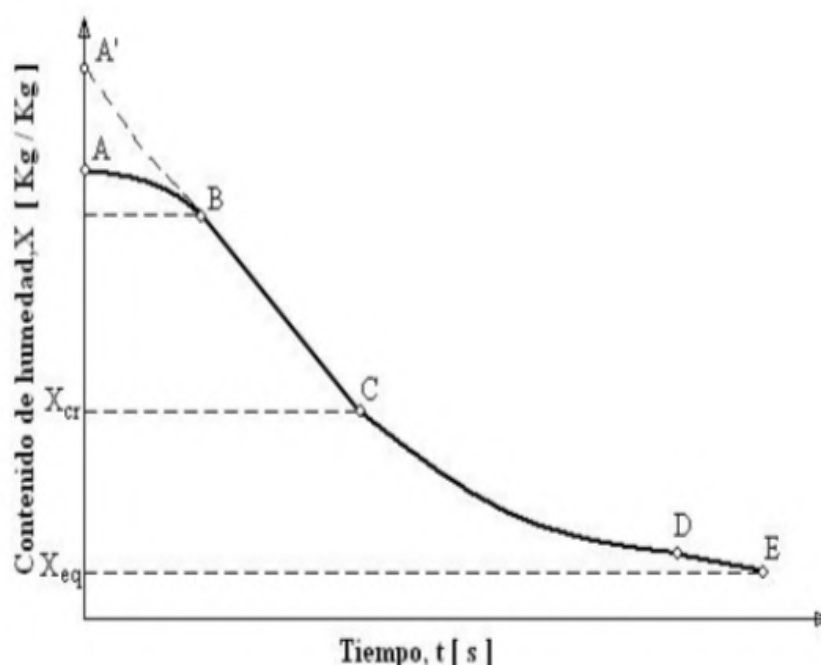
de velocidad de secado depende del tipo de concentrado, la velocidad de secado y el contenido de humedad en la primera etapa de secado (p. 36).

2.3.16.1. Curva de Secado del Concentrado de Cobre.

Ortiz (2018) define que, los gráficos de la operación de secado del concentrado de cobre sirven para determinar el contenido de humedad en función del tiempo. En toda etapa inicial de la curva de secado se muestra una caída lenta del porcentaje de humedad (sección A-B), al terminar esta sección inicial la velocidad de secado adquiere una velocidad constante (tramo B-C). Después de esta etapa la muestra alcanza un punto crítico, donde el comportamiento lineal de la humedad se desvía y tiende a estabilizarse porque se llega a la eliminación total del contenido de humedad como se observa en la Figura 17 (p. 31).

Figura 17

Diagrama de la curva de secado del tiempo vs contenido de humedad



Nota: (Ortiz, 2018, p. 31).

Ortiz (2018) describe que en el gráfico se pueden ver las fases de velocidades de secado constantes y decrecientes, el gráfico de secado tiene esta forma porque está relacionado con el fenómeno de transferencia de calor y masa. En el primer paso, la superficie del material aún está cubierta por una fina capa de líquido, que normalmente se seca hasta que se pierde la humedad, libre o capilar. El contacto con el aire inicia la operación de secado y, como resultado de la resistencia a la transferencia de masa de la capa exterior del aire, la velocidad de secado disminuye. Como resultado, la tasa de evaporación se puede representar como un factor de masa y un gradiente de humedad (p. 32).

2.3.17. Termodinámica del Secado

Ortiz (2018) define que, el estudio de la termodinámica de secado se basa en la variación de la humedad en función del tiempo. Esta humedad puede perderse por evaporación, tiempo, consumo de energía o calor. Por otro lado, la pérdida de agua también esta influenciada por la transferencia de masa, superficie de partículas. Existen diferentes modelos que tratan de explicar cómo el calor suministrado interviene a la pérdida de humedad (p. 30).

La pérdida de humedad aumenta a medida que disminuye el diámetro de la partícula. Las impurezas, que alteran el equilibrio de secado en la superficie de la partícula, son otro factor que afecta la operación de secado.

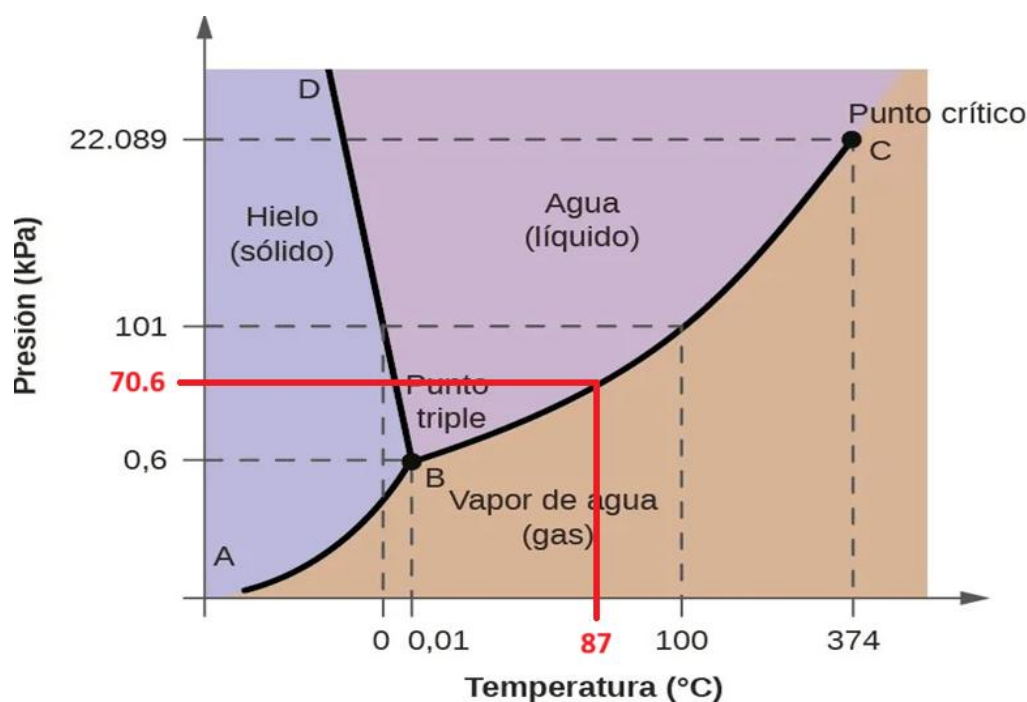
2.3.17.1. Diagrama de Fases del Agua.

El diagrama de fases del agua también conocido como el diagrama de tres fases (sólido, líquido, gaseoso) es utilizado para identificar el estado físico de una muestra de agua en diferentes condiciones de presión y temperatura.

Rice University (2020) identifica y define que, los diagramas de fase se utilizan para determinar el estado físico de una muestra de agua en condiciones específicas de presión y temperatura. Por ejemplo, una presión de 50 kPa y una temperatura de -10 °C corresponde a la región etiquetada como "hielo" en el diagrama. Bajo estas condiciones, el agua existe solo en forma sólida (hielo). Una presión de 50 kPa y una temperatura de 50 °C corresponde a la región del "agua" que solamente está en forma líquida. A 25 kPa y 200 °C, el agua solo existe en forma gaseosa.

Figura 18

Diagrama de fases del agua



Nota: (Rice University, 2020).

La curva BC de la Figura 18 es un gráfico de la presión de vapor versus a la temperatura. Esta curva de "líquido-vapor" separa las regiones líquida y gaseosa del diagrama de fase e indica el punto de ebullición del agua a diferentes presiones. Por ejemplo, a 1 atmósfera el

punto de ebullición es de 100 °C. Se debe tener en cuenta que la curva de estado líquido-vapor acaba a una temperatura de 374 °C y una presión de 218 atm, lo que da a conocer que el agua por encima de esta temperatura no puede estar como líquido independientemente de la presión (Rice University, 2020).

La curva de vapor sólida (marcada en la curva AB de la Figura 18 representa la temperatura y la presión a las que el hielo y el vapor de agua están en equilibrio. Estos pares de datos de temperatura y presión son los puntos de sublimación o precipitación del agua. La presión de vapor de hielo es de aproximadamente 0,20 kPa a -10 °C si podemos extender la línea de vapor sólido. Entonces, el hielo se sublimará si colocamos una muestra solidificada en el vacío con una presión inferior a 0,20 kPa (Rice University, 2020).

La curva BD, que representa el punto de fusión y congelación del agua, muestra la temperatura y la presión a las que el hielo y el agua líquida están en equilibrio. Tenga en cuenta que la curva se inclina ligeramente hacia abajo (muy larga para una comprensión más profunda), lo que indica que el punto de fusión del agua baja ligeramente a medida que aumenta la presión. Dado que la mayoría de las sustancias tienen un punto de fusión que aumenta con la presión, el agua no es una sustancia común en este sentido (Rice University, 2020).

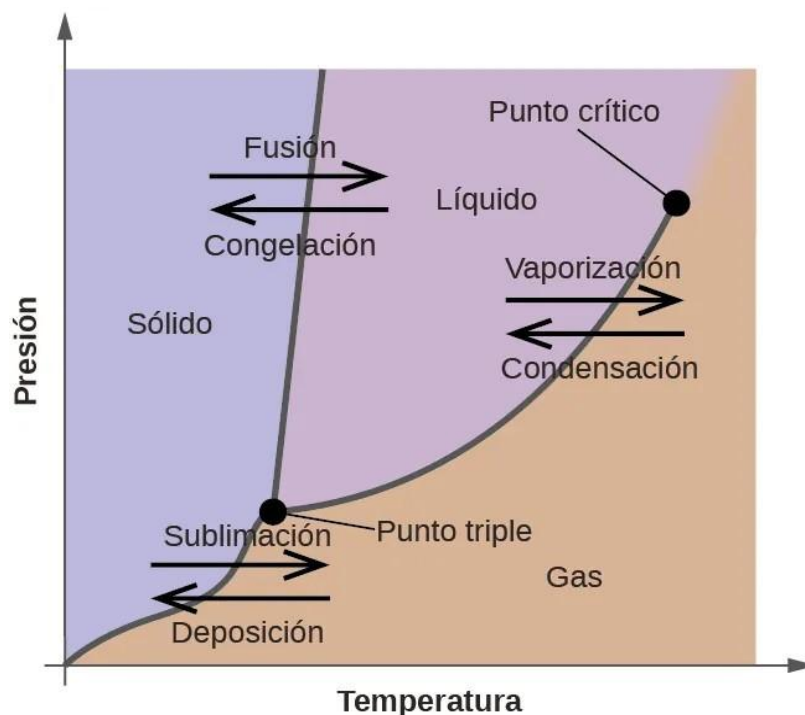
Hallasi (2018) comenta que la intersección de las 3 curvas está marcada como B; a la presión y temperatura dadas por este punto, coexiste un equilibrio trifásico de agua. Este par de datos de temperatura y presión se denomina punto triple. A presiones por debajo del punto triple, el agua no puede estar en forma líquida independientemente de la temperatura (p. 37).

A las condiciones atmosféricas en la ciudad del Cusco - Perú se encuentra que a 70.6 KPa o 0.697atm se puede apreciar que corresponde a una temperatura de 87 °C, dicho esto a una

temperatura de 90 °C a 110 °C se puede afirmar que el contenido de agua en los concentrados de cobre se libera en forma de vapor de agua que posteriormente es colectado y liberado al exterior con la ayuda de los hornos de secado por aire inducido,

Figura 19

Cambios de estado del agua en el diagrama de fases



Nota: (Rice University, 2020).

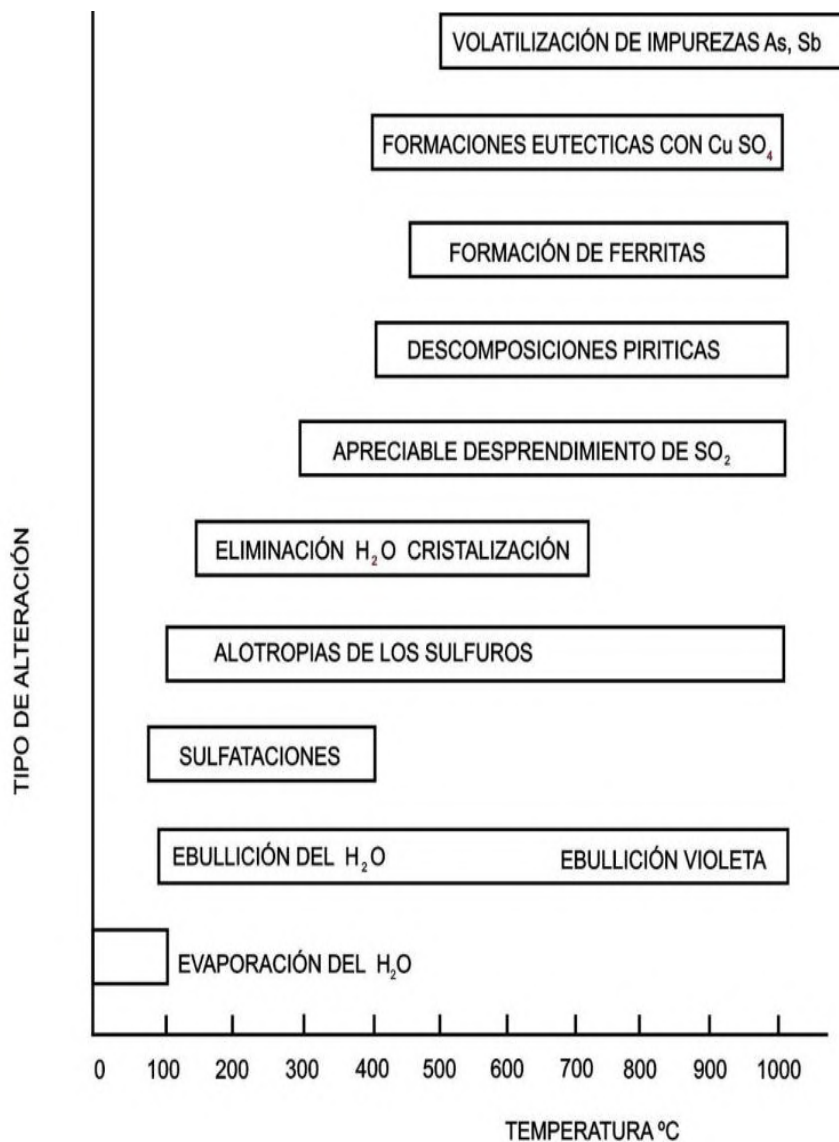
2.3.17.2. Alteraciones del Concentrado Durante el Secado.

Hallasi (2018) afirma que propósito del secado industrial no es causar más cambios que la pérdida de agua. Así, los procesos son físicos, pero pueden tener consecuencias significativas. La Figura 20 muestra los principales tipos de concentrados en el rango de temperatura ambiente hasta los 1000 °C; de acuerdo con esta figura, teóricamente no se pueden esperar más cambios que la evaporación del agua, esta es la simulación inicial y, en algunos casos, el próximo inicio de cambios alotrópicos de sulfuro. Sin embargo, todas estas teorías suponen que ninguna partícula condensada alcanza nunca una temperatura superior de 90 °C a

100°C. En esta zona (muchos hornos funcionan a gran altura y el agua hierve por debajo de los 100 °C) por ende la eliminación del agua es más vigorosa a medida que se produce la ebullición (p. 37).

Figura 20

Alteraciones del concentrado durante la operación de secado



Nota: (Hallasi, 2018, p. 37).

2.3.17.3. Poder Calorífico del Agua.

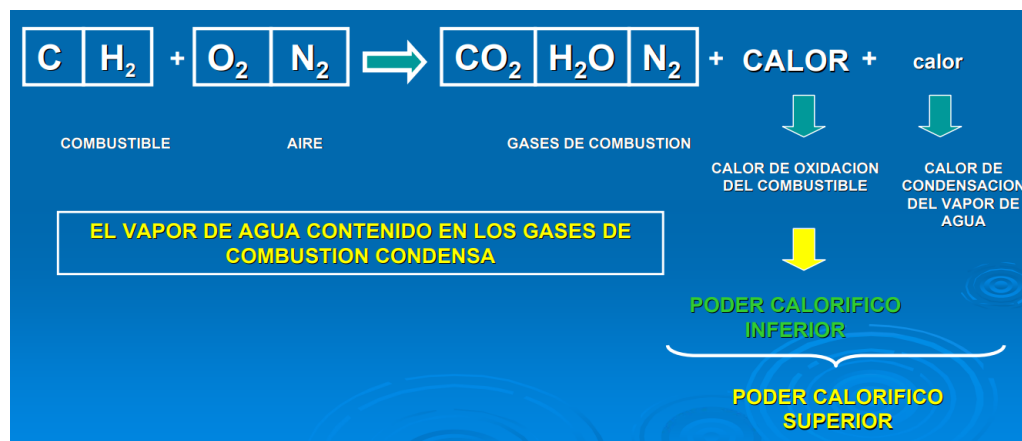
Khan Academy (2018) define que el poder calorífico del agua es una propiedad de la materia relacionada con la energía necesaria para aumentar su temperatura. El agua tiene un poder calorífico específico muy alto, por lo que, para subir su temperatura, se debe absorber una gran cantidad de calor por unidad de masa. Por ejemplo, se necesitan 4.184 J (julios) o 1 Cal para incrementar la temperatura de 1 kg de agua en 1°C.

2.3.17.3.1. Poder Calorífico Superior.

Fernandez (2019) indica que el poder calorífico superior también denominado poder calorífico neto se define como la cantidad total de calor que se origina en la combustión completa de una unidad de masa de combustible cuando el vapor de agua que es producido en dicha combustión es condensado y, por ende, se puede aprovechar el calor latente en este cambio de fase de gas a líquido como se muestra en la Figura 21. De esta manera al condensar el vapor de agua que se encuentran en los gases de combustión se tendrá un aporte de calor de: 597 kcal/kg vapor de agua condensado (p. 30).

Figura 21

Poder calorífico superior



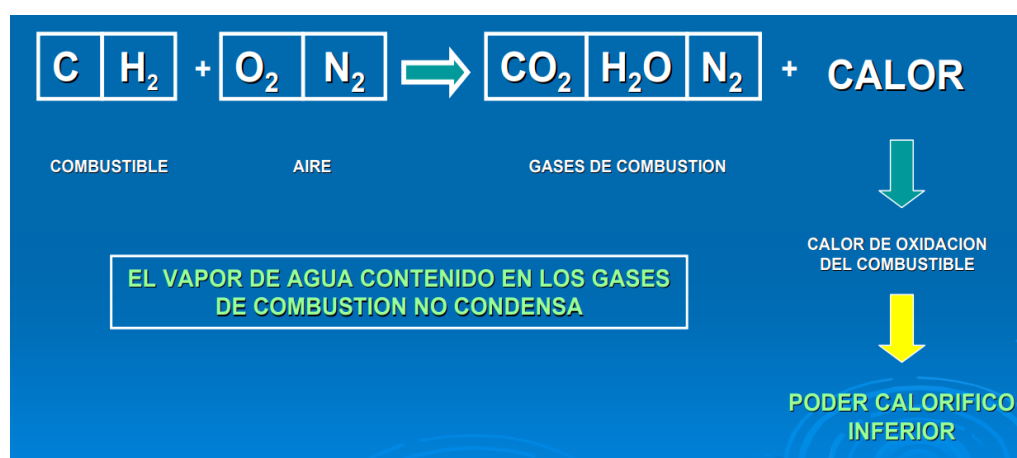
Nota: (Fernandez, 2019, p. 5).

2.3.17.3.2. Poder Calorífico Inferior.

Fernandez (2019) define que el poder calorífico inferior considera que el vapor de agua que contienen los gases de combustión no se condensa. De esta manera, no hay suministro de calor añadido debido a la condensación de vapor de agua (p. 40). Únicamente se puede aprovechar el calor de oxidación del combustible como se muestra en la Figura 22.

Figura 22

Poder calorífico inferior



Nota: (Fernandez, 2019, p. 5).

2.3.17.4. Relación Entre los Poderes Caloríficos.

La relación entre los poderes caloríficos se relaciona con la siguiente ecuación:

$$PCI = PCS - 597 * G \quad (11)$$

Donde:

PCI: Poder calorífico inferior

PCS: Poder calorífico superior

597: Calor de condensación del agua a 0 °C (kcal/kg agua)

G: Porcentaje en peso del agua formada por la combustión del H₂ más la humedad particular del combustible (kg agua /kg combustible).

$$G = 9H + H_2O \quad (12)$$

Donde:

9: Son los kilos de agua que se generan al oxidar un kilo de hidrogeno.

H: Porcentaje de hidrogeno incluido dentro del combustible.

H₂O: Porcentaje de humedad del combustible.

Reemplazando la ecuación (12) en la ecuación (11) se tiene que:

$$PCI = PCS - 597 * (9H + H_2O) \quad (13)$$

2.3.17.5. Calor de Vaporización del Agua.

Khan Academy (2018) afirma que se necesita mucho calor para elevar la temperatura del agua líquida, y se necesita mucho calor para vaporizar una cierta cantidad de agua porque los enlaces de hidrógeno tienen que romperse para liberar las moléculas en forma de gas. Es decir, el agua posee un alto poder calorífico de vaporización, que es la energía suficiente para convertir un gramo de una sustancia líquida en gas a temperatura constante. A 100°C (punto de ebullición del agua) el calor de vaporización del agua se da aproximadamente 540 cal/g. Tenga en cuenta que incluso a temperaturas más bajas, algunas moléculas de agua con alta energía cinética saldrán de la superficie del agua.

2.3.18. Determinación de la Temperatura de Secado

Instituto Nacional de la Calidad INACAL (2016) indica según norma que la temperatura de secado para los concentrados de cobre debe ser de 105 °C ± 5 °C, esto

debido a las interferencias que pudiesen presentar como la oxidación y sublimación del concentrado (p. 4).

2.3.19. *Peso de la Muestra*

Da a conocer a la masa o cantidad de materia que contiene dicha muestra. Por lo general suele expresarse en unidades de masa como gramos (g) o kilogramos (kg).

2.3.19.1. *Peso Específico del Cobre.*

Rojas (2021) define que el peso específico del cobre depende de la forma en que existe. El cobre puro a 20 °C (68°F) es de aproximadamente 8.96 gramos por centímetro cubico. Sin embargo, cuando el cobre está en forma mineral como calcopirita (sulfuro de cobre y hierro), su peso específico puede cambiar por la presencia de otros elementos que constituyen esta muestra (p. 5).

Para determinar el peso específico de un mineral de cobre en especial, por lo general se debe conocer la composición exacta que lo constituye y luego calcular el peso específico en función de la densidad de cada componente que habita en ello.

2.3.19.2. *Gravedad Especifica.*

Quinto (2018) define que “la gravedad especifica o también se le llama como densidad relativa (Gs), es el peso del material dividido por el peso unitario del agua destilada a 4°C”, se calcula mediante la siguiente ecuación (14) en el método de la Fiola y Probeta (p. 3):

$$Gs = \frac{P}{P + A - B} \quad (14)$$

Donde:

P: peso del mineral

A: Fiola + Agua

B: Fiola + Agua + Mineral

Para el método de la probeta se calcula mediante la misma ecuación (14) en donde P viene a ser 100 gramos de mineral.

2.3.20. Pericia del Analista

Se refiere al grado de conocimientos, habilidades y capacidades que una persona ha adquirido a lo largo del tiempo en un campo determinado. Esto se puede medir por cuánto tiempo ha trabajado en un determinado campo y los logros y proyectos completados durante ese tiempo. El nivel de experiencia puede variar de principiante ha experimentado y puede adquirirse mediante educación formal, capacitación en el trabajo y práctica continua.

Según la Organización Internacional de Normalización (2017) describe la importancia de la pericia del analista, nos dice que todo laboratorio es responsable de la capacitación del personal analista para que este a su vez con una evaluación por competencia técnica proporcione resultados válidos y confiables a la hora del análisis de humedad de los concentrados de cobre (p.8).

2.4. Definición de Términos Básicos

2.4.1. Muestra Representativa

“Cantidad de concentrado que representa una mayor masa de concentrado con precisión y sesgo dentro de los límites aceptables” (Instituto Nacional de Calidad INACAL, 2017, p. 2).

2.4.2. Lote

“Cantidad de concentrado a ser muestreado” (Instituto Nacional de Calidad INACAL, 2017, p. 2).

2.4.3. Incremento

“Cantidad de concentrado seleccionado por un dispositivo de muestreo en una operación” (Instituto Nacional de Calidad INACAL, 2017, p. 3).

2.4.4. Selección de Incremento

“Proceso de selección que consiste en extraer del lote, o de una muestra intermedia, incrementos sucesivos que se pueden combinar para constituir una muestra” (Instituto Nacional de Calidad INACAL, 2017, p. 3).

2.4.5. Preparación

“Operación no selectiva sin división, tales como transferencia de muestras, secado, Conminución u homogeneización” (Instituto Nacional de Calidad INACAL, 2017, p. 4).

2.4.6. Conminución

“Operación de reducción del tamaño de partícula mediante trituración, molienda o pulverización” (Instituto Nacional de Calidad INACAL, 2017, p. 4).

2.4.7. Muestra para Humedad

“Cantidad representativa de concentrado a partir de la cual se toman las porciones de ensayo para determinar la humedad” (Instituto Nacional de Calidad INACAL, 2017, p. 5).

2.4.8. Muestra de Laboratorio

“Muestra que es procesada para poder enviarla al laboratorio y ser utilizada para un posterior procesamiento y selección de una o más muestras de ensayo para su análisis” (Instituto Nacional de Calidad INACAL, 2017, p. 5).

2.4.9. Homogenización

“Preparación que reduce la heterogeneidad de distribución del concentrado”

(Instituto Nacional de Calidad INACAL, 2017, p. 6).

2.4.10. Aglomerado

“Grupo de partículas que se mantienen unidas por fenómenos químicos o físicos” (Instituto Nacional de Calidad INACAL, 2017, p. 6).

2.4.11. Tamaño Máximo Nominal de Partícula

“Tamaño de abertura de un tamiz que retiene el 5 % de la masa de concentrado” (Instituto Nacional de Calidad INACAL, 2017, p. 6).

2.4.12. Análisis Químico

“Determinación cuantitativa de los constituyentes químicos requeridos en la porción de ensayo a analizar” (Instituto Nacional de Calidad INACAL, 2017, p. 6).

2.4.13. Error

“Es cualquier medida cuantitativa, es la diferencia entre el valor real y el valor obtenido por una medición individual” (Instituto Nacional de Calidad INACAL, 2017, p. 6).

2.4.14. Sesgo

“Diferencia estadísticamente significativa entre la media de los resultados de ensayo y un valor de referencia aceptado” (Instituto Nacional de Calidad INACAL, 2017, p. 7).

Capítulo III

Hipótesis y Variables

3.1. Hipótesis General

La optimización del tiempo de análisis de humedad por secado de las muestras del despacho de concentrado de cobre de Antapaccay es influenciada por la variación de la temperatura de secado, peso de la muestra y pericia del analista.

3.2. Hipótesis Específicas

- La temperatura de secado tiene un efecto significativo en el tiempo de análisis de humedad por secado, a mayor temperatura de secado se logra menor tiempo de análisis.
- El peso de la muestra influye de manera significativa en el tiempo de análisis de humedad por secado, a menor peso de la muestra se logra menor tiempo de análisis.
- La pericia del analista influye de manera significativa en el tiempo de análisis de humedad por secado, a mayor pericia del analista se logra menor tiempo de análisis.

3.3. Variables

3.3.1. Identificación de Variables

3.3.1.1. Variable Dependiente.

- Tiempo de análisis de humedad por secado.

3.3.1.2. Variables Independientes.

- Temperatura de secado.
- Peso de la muestra.
- Pericia del analista.

3.3.2. *Identificación de Indicadores*

3.3.2.1. Indicador Dependiente.

- Tiempo dedicado al secado (h)

3.3.2.2. Indicadores Independientes.

- Cambio de aspecto del concentrado (°C)
- Cantidad de concentrado en la muestra (Kg)
- Grado de Experiencia (P; E)

3.4. Operacionalización de Variables e Indicadores

A continuación, en la Tabla 2 se muestra la tabla de operacionalización de variables e indicadores.

Tabla 2*Operacionalización de variables e indicadores*

Variable Nominal	Definición Conceptual	Definición Operacional	Indicador	Rango	Unidad	Técnica e Instrumento de medición
Tiempo de análisis de humedad por secado	Es el tiempo que permanece la muestra de concentrado en el horno de secado.	Tiempo calculado para lograr el secado del concentrado de cobre	Tiempo dedicado al secado	4 - 12	h	NTP-ISO 10251 - 12743 Cronometro
Temperatura de secado	Temperatura del horno de secado por aire forzado, sin afectar las propiedades fisicoquímicas.	Temperatura que es programada en el horno para secar las muestras de concentrado de cobre.	Cambio de aspecto del concentrado	90 - 110	°C	NTP-ISO 10251 Termocupla
Peso de la muestra	Cantidad de kilogramos con la que cuenta la muestra	Se obtiene durante el pesaje de la muestra de los camiones de concentrado de Cu	Cantidad de concentrado en la muestra	10 – 20	kg	Pesaje de muestra en balanza analítica
Pericia del analista	Grado de experiencia, habilidad que tiene el personal.	Experiencia que tiene el analista para realizar el análisis de humedad.	Grado de experiencia	Principiante - Experimentado	P - E	Verificación de tiempo de trabajo

Capítulo IV

Metodología

4.1. Ámbito del Estudio, Localización Política, Geográfica

Antapaccay está ubicado a 15 km del poblado de Espinar y aproximadamente a 255 km distante entre las ciudades de Cusco y Arequipa. Los accesos terrestres principales lo constituyen las vías nacionales que conectan Antapaccay con estas ciudades, en la Figura 23 se observa la ubicación de las Plantas Antapaccay y Tintaya.

Figura 23

Ubicación geográfica Antapaccay



Nota: Figura recopilada de Google Earth, nos muestra satelitalmente las plantas Antapaccay y Tintaya que comprenden todo el proceso productivo de la Compañía Minera Antapaccay para la obtención del concentrado de cobre.

4.1.1. Coordenadas

- Latitud: 14°54'15.31" S
- Longitud: 71°19'08.05" O
- Altitud: 4131msnm

4.2. Diseño de investigación: Método, Tipo, Alcance

4.2.1. *Diseño de la Investigación*

“El diseño experimental es un procedimiento riguroso usado para comprobar hipótesis causales mediante la manipulación de variables independientes” (Vara, 2015, p. 248). Por lo que el diseño para la investigación es de carácter experimental.

$$X \rightarrow Y \text{ CAUSA} \rightarrow \text{EFECTO} \quad (15)$$

Donde:

X: Es la variable manipulable (causa).

Y: Es la variable que depende de otro parámetro manipulable (consecuencia).

4.2.2. *Método de investigación*

Se usará el método científico, porque se parte de conocimientos teóricos generales y lógicos para demostrar hechos en concreto, en este caso, cómo influyen las variables operacionales como temperatura de secado, peso de la muestra, pericia del analista en la variable dependiente.

4.2.3. *Tipo de investigación*

Esta investigación es aplicada, ya que se manipula las variables como la temperatura de secado, peso de la muestra, pericia del analista y se observa el grado en el que dichas variables implicadas y manipuladas producen un efecto determinado en la variable dependiente.

4.2.4. *Alcance de investigación*

(Hernandez, Fernandez, & Baptista (2014) comentan que el propósito del alcance de investigación correlacional es descubrir en que grado se asocian o

correlacionan dos o más conceptos, categorías o variables en una muestra o contexto particular. A veces se analizan las correlaciones entre solo dos variables, pero los estudios a menudo encuentran correlaciones entre tres, cuatro o más variables (p. 93).

Es por ello por lo que la investigación tiene un alcance correlacional, sin embargo, también se llega a un alcance explicativo, ya que se busca hallar la relación entre las variables de estudio para explicar cómo interviene la temperatura de secado, peso de la muestra, pericia del analista en la optimización del tiempo de análisis de humedad por secado.

4.3. Población de Estudio

4.3.1. Población

La población es el total de concentrado de cobre final que hay en el almacén de despacho de la Compañía Minera Antapaccay S.A.

4.3.2. Muestra

La muestra representativa es tomada de los camiones cargados de concentrado de cobre que salen rumbo al puerto Matarani.

4.3.3. Tamaño de Muestra

Se determinó mediante la siguiente ecuación (16)

$$n = \frac{Z^2 * S^2}{e^2} \quad (16)$$

Donde:

n: tamaño de la muestra

Z: Nivel de confianza al 95% = 1.96

S: Desviación estándar = 0.067

e: error máximo de muestreo = 0.05

Reemplazando los datos en la ecuación (16) se tiene que:

$$n = \frac{1.96^2 * 0.067^2}{0.05^2}$$

$$n = 6.89 \simeq 7$$

A partir del tamaño de muestra calculado según ecuación (16); el tamaño de muestra utilizado obedece a juicio de personal experto en el área de control de calidad de Antapaccay es por ello que el tamaño de muestra “n” es de 8 muestras con 3 réplicas dando un total de 24 muestras para análisis de datos, con peso aproximado de 10 - 20 kg/muestra con un total de 100kg aproximadamente de peso de muestra.

4.3.4. Técnicas de Recolección de Información

La información es obtenida por los tesisistas en el campo de trabajo del área de Despacho de Concentrado de la Compañía Minera Antapaccay S.A. A su vez, se complementará los conocimientos con referencias bibliográficas confiables.

4.3.5. Técnicas de Instrumentos de Recolección de Datos

Se realiza el muestreo automático con brazo robótico operado por los tesisistas con 8 incrementos que formarán parte de 1 muestra, cuyas muestras totales serán de 8 muestras con 3 submuestras o repicas.

4.3.6. Técnicas de Procesamiento de Análisis de Datos

Se lleva a cabo por Estadística Inferencial con el paquete estadístico Minitab, creando y diseñando un diseño experimental factorial mediante el comando DOE de Minitab.

4.4. Validez y Confiabilidad de Instrumentos

Se utilizan los instrumentos y equipos de la Compañía Minera Antapaccay, que cuentan con certificados de calibración lo que hace que dichos resultados obtenidos sean veraces y confiables.

4.5. Plan de Análisis de Datos

Esta investigación se analiza con el método experimental factorial 2^3 , usando el estadístico F de Fisher. Partiendo de esta premisa, los métodos científicos permiten poner a estudio la hipótesis planteada en este trabajo, a continuación, en la Tabla 3 se muestra el método experimental factorial 2^k con 3 variables y 3 réplicas a utilizar.

Tabla 3

Plan de Análisis de Datos

Muestra	A	B	C	Y1	Y2	Y3
1	-	-	-	Y _{1.1}	Y _{2.1}	Y _{3.1}
2	+	-	-	Y _{1.2}	Y _{2.2}	Y _{3.2}
3	-	+	-	Y _{1.3}	Y _{2.3}	Y _{3.3}
4	+	+	-	Y _{1.4}	Y _{2.4}	Y _{3.4}
5	-	-	+	Y _{1.5}	Y _{2.5}	Y _{3.5}
6	+	-	+	Y _{1.6}	Y _{2.6}	Y _{3.6}
7	-	+	+	Y _{1.7}	Y _{2.7}	Y _{3.7}
8	+	+	+	Y _{1.8}	Y _{2.8}	Y _{3.8}

4.6. Infraestructura Disponible

Los análisis y pruebas experimentales de laboratorio se realizan en el laboratorio de Control de Calidad en las instalaciones de la Compañía Minera Antapaccay S.A.

4.7. Equipos e Instrumentos

Equipos de protección personal:

- EPP Básico
- Mascara para protección de polvo
- Guantes de nitrilo / cuero
- Orejeras o tapones auditivos
- Traje descartable Tyvex
- Lentes de protección personal

Requerimiento de equipos e instrumentos:

- Balanza de precisión
- Pulverizador de anillos con olla de masa B800 y B2000
- Horno de secado con circulación de aire forzado regulado a 105 ± 5
- Impresora de etiquetas
- Extractor de polvo
- Computadora con conexión a LIMS y Minitab
- Compresora de aire
- Brazo robótico para muestreo automático marca KUKA
- Selladora de bolsas al caliente
- Divisor rotatorio de mesa

- Mesa de trabajo de superficie lisa
- Palas JIS 5R y 1R
- Papel kraft
- Plancha metálica para romper aglomerados de concentrado de cobre
- Bandeja de secado de acero inoxidable
- Tecle para levantamiento de olla B2000
- Tamiz Nro 140 ASTM
- Balde polipropileno 20l
- Precintos de seguridad
- Sobres de aluminio
- Camisa o sonda de 2" de diámetro y 130cm de largo. (para robot)

Capítulo V

Resultados y Discusión

5.1. Procedimiento Experimental para el Muestreo

Se muestrearon 8 camiones de concentrado de cobre (ver Figura 25) y cada muestra se trabajó por triplicado, dando un total de 24 ensayos a correr para el diseño experimental. El muestreo se realizó sobre concentrado cargado en el camión que lo transporta, por toma incrementos con una sonda de muestreo operada por un brazo robótico de manera automática, y como plan de contingencia se tuvo el método de muestreo manual.

5.1.1. *Peso de la Muestra*

El peso de la muestra primaria por camión fue para las muestras 1,2,5,6 de 10kg aproximadamente mientras que para las muestras 3,4,7,8 de 20kg aproximadamente como se observa a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4

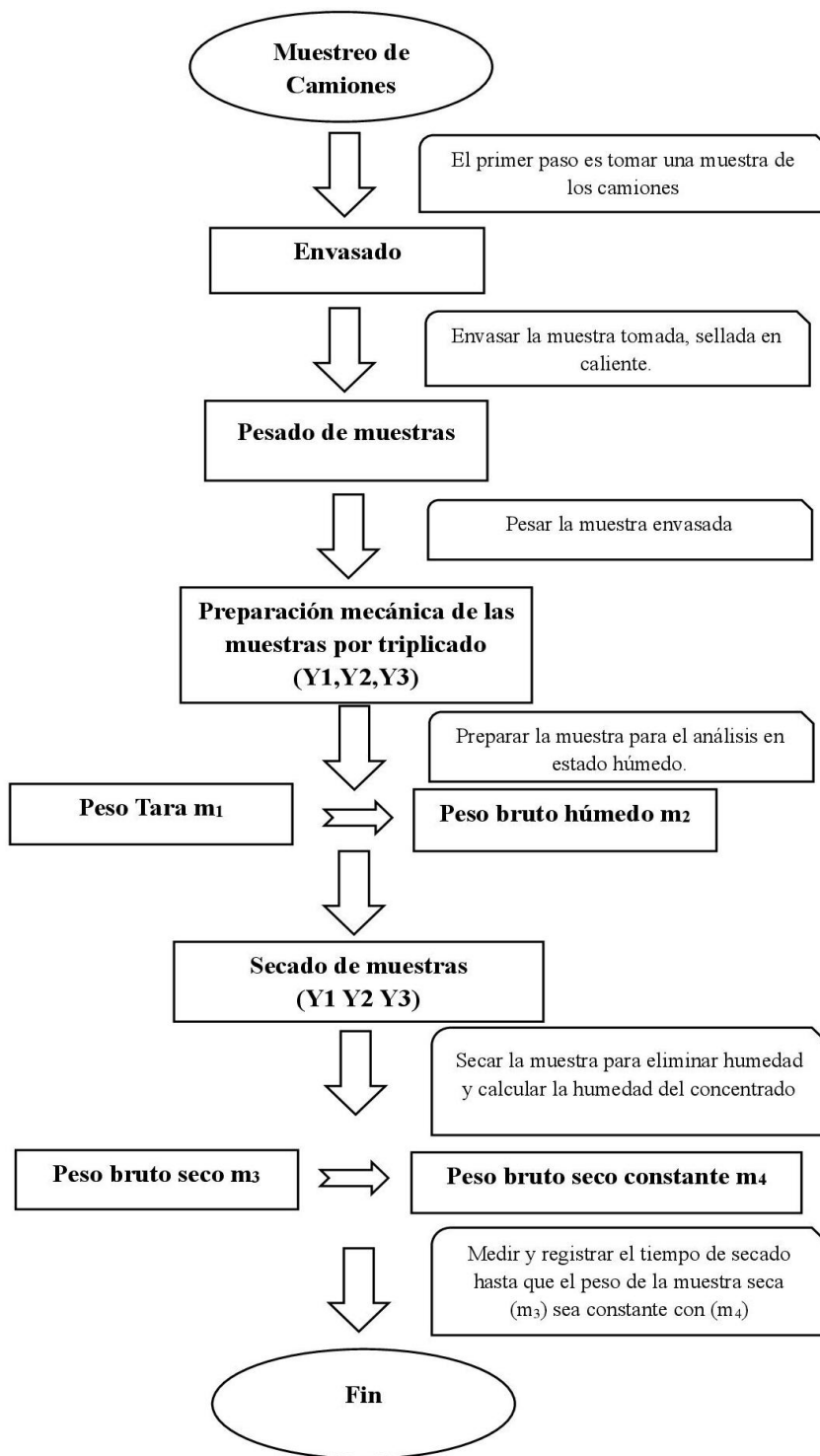
Peso de la muestra

Muestra	Peso de la muestra (kg)
1	10.13
2	9.95
3	20.07
4	20.11
5	10.18
6	10.20
7	20.19
8	20.17

5.1.2. Diagrama de Flujo Experimental

Figura 24

Diagrama de flujo para la operación de análisis de humedad



5.1.3. Condiciones de la Muestra

Las muestras fueron colectadas en bolsas de polietileno y selladas al calor o con precinto de seguridad, conteniendo la información relevante para su identificación: fecha, tipo de muestra, placas del camión, código QR visible, nombre de empresa de transportes (ver Figura 25) Esta información se encuentra en las etiquetas que se emiten en balanza y los conductores entregaron (2 copias) al personal analista previo al ingreso del camión a la zona de muestreo.

Figura 25

Muestras de concentrado para procedimiento experimental



5.1.4. Condiciones Ambientales Requeridas

La balanza de precisión y horno de secado operaron bajo las condiciones siguientes:

- Temperatura ambiente: 5-40°C
- Humedad relativa: 80% - 40%
- Sin corrientes de aire
- Ambiente libre de vibraciones

Para evitar la contaminación cruzada dentro del área, la preparación física de las muestras para la determinación de humedad se realizó bajo campana de extracción para evitar la generación de polvo también a su vez se contó con laboratorio específico para preparación de muestras de concentrado de despacho.

5.1.5. Muestreo por Brazo Robótico

- Tamaño máximo nominal: menor a 16 mm
- Masa mínima del incremento primario: 0,25 kg.
- Coeficiente de variación: $\leq 20\%$
- Dimensiones de la sonda del brazo robótico: Diámetro 2.0 pulgadas y largo 1.3 m

5.1.6. Método de Muestreo Automático

Para iniciar el muestreo, el camión debe estar cargado con el concentrado que se ha determinado despachar a puerto, ya sea de procedencia Antapaccay o Tintaya.

Se revisó que el concentrado en el camión a ser muestreado no presente aglomerados compactados. Existen diferentes tipos de camión, según la tolva, los cuales se clasifican en largo o cuadrado, especial, cúpula, cúpula alto; que a continuación se detallan.

- Largo o cuadrado: Tolva larga y superficie totalmente plana, mayor a 10m que no descarga automáticamente, cubierta con lona.
- Especial: Tolva corta, menor a 10m que no descarga automáticamente, cubierta con lona, cuenta con “botella” o pistón en la tolva.
- Cúpula: Que descarga automáticamente, cubierta hermética, aplica a empresa Servosa.

- Cúpula alto: Que descarga automáticamente, cubierta hermética, aplica a las demás empresas de transportes de este tipo.

En el panel del muestreo automático, se ingresó el nombre de usuario y clave, luego se ingresaron los datos del camión y seleccionó el tipo de camión, seguidamente seleccionó comando “Ingresar camión”, se levantó la barrera de ingreso con el semáforo indicando en color verde.

Figura 26

Ingreso y selección de camión

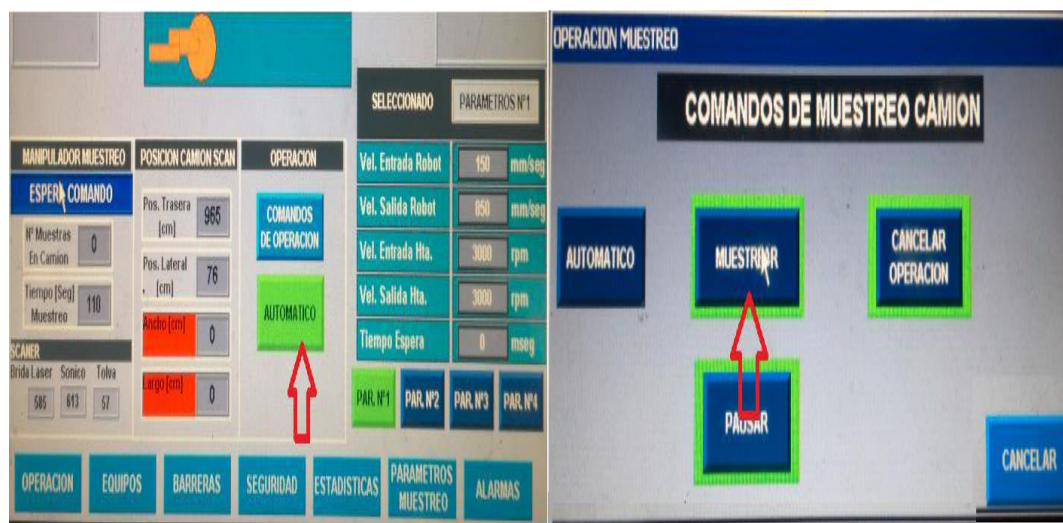


El camión debe ingresar a una sola velocidad, es decir velocidad constante, hasta que el semáforo de salida cambie de color del verde al rojo, lo cual indica que el camión se encuentra posicionado y listo para el muestreo. Para el caso del tipo cúpula, una vez posicionado recién se levanta la tapa hermética.

En el panel debe figurar operación en Automático, luego se seleccionó el comando “muestrear” como se observa en la Figura 27.

Figura 27

Comandos de muestreo de camión



La sonda debe realizar 8 inserciones (incrementos), donde cada incremento se toma desde el fondo del concentrado de manera vertical para que la muestra sea representativa del lote. Todos los incrementos son conservados en el capacho de la herramienta de muestro del brazo robótico hasta finalizar los 8 incrementos, luego la muestra que es contenida en el capacho descarga en la tolva para posteriormente ir al envasado con bolsa plástica sellada al caliente que contiene la muestra número 1, se repite el procedimiento de muestreo hasta obtener 8 muestras de 8 camiones. En la Figura 28 se puede observar el brazo robótico empezando con la toma de incrementos para el camión Nro. 1 convencional Largo.

Figura 28*Muestreo de brazo Robótico*

La barrera de salida de la zona de muestreo se levanta automáticamente cuando el muestreo finaliza y el semáforo cambia a color verde, donde el camión procede a retirarse. El sistema se encuentra programado para que la sonda realice una limpieza por golpeteo, al finalizar la descarga de cada muestra del lote.

La muestra sellada al caliente se pega la etiqueta correspondiente de identificación para la muestra 1 y así sucesivamente para las siguientes muestras.

5.2. Procedimiento Experimental para el Tiempo de Análisis de Humedad

5.2.1. Preparación Física de Muestras para Análisis de Humedad

Las muestras 1,2,3,4 fueron preparadas por el analista principiante (P) mientras que las muestras 5, 6,7,8 fueron preparadas por el analista experimentado (E) quien demostró por competencia técnica que sus resultados son válidos y confiables.

5.2.1.1. Pesaje de las Bandejas Vacías (Peso tara m_1).

Se pegó las etiquetas Y1, Y2, Y3 para cada muestra generadas anteriormente en el papel kraft de cada bandeja y se registró el peso tara en tabla Excel tal como se observa a continuación en la Figura 29.

Figura 29

Peso Tara m_1



5.2.1.2. División por Incrementos.

Las actividades de preparación de muestras tienen que realizarse lo más rápido posible, esto con el fin de evitar pérdida de humedad en la muestra según lo indicado en la NTP ISO 12743 sección 15.4.7. Separación manual por incrementos. Se vertió la muestra primaria sobre la mesa de trabajo y con ayuda de la plancha metálica acondicionada, se rompió los aglomerados por aplastamiento.

Se colocó el marco metálico (ver Figura 30), asegurando que contenga toda la muestra, luego se extendió el concentrado en todo el marco metálico asegurando así un espesor constante

entre los 20 a 35 milímetros. Se tomó la rejilla con las divisiones 5x4 y marcando una matriz de 20 partes sobre la muestra extendida como se muestra en la Figura 30, luego se retiró la rejilla.

Figura 30

Preparación mecánica de muestras húmedas



Se insertó una espátula en forma vertical a través del concentrado extendido hasta llegar al piso de este. Después se insertó la pala JIS numero 5 hasta tocar el piso de la mesa de trabajo para recolectar todas las partículas del concentrado, levantar y con ayuda de la espátula prevenir posible caída de concentrado (ver Figura 31).

Se descarga el incremento en la bandeja Y1, Y2, Y3 y se repite la operación hasta obtener los 20 incrementos. El peso mínimo de la muestra que se obtiene de los 20 incrementos debe ser mayor o igual a 1000 gramos (Norma NTP ISO 12743, sección 16.1.1. Masa de la porción de ensayo), caso contrario se repite el procedimiento.

Figura 31

Toma de incrementos para las bandejas Y1 y Y2



El coeficiente de variación entre la masa de los 20 incrementos debe ser menor al 20%. Según se indica en la NTP ISO 12743-2017, artículo 7.2.9, tal como se da a conocer a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5

Coeficiente de variación para una masa de 20 incrementos

Muestra para división	Método de división	Coeficiente de Variación
Incremento	Con base en la masa	< 20%

5.2.2. Secado para Análisis de Humedad

5.2.2.1. Registro del Peso Húmedo (Peso Bruto Húmedo m2).

Previo al pesaje bruto húmedo, se debe limpiar la parte externa de las bandejas con trapo seco y verificar que ningún agente externo afecte el pesaje de muestra. Se pesó las bandejas Y1, Y2, Y3 para cada muestra registrando el peso bruto húmedo en una tabla Excel.

Seguidamente se colocaron las bandejas con su peso húmedo en rack; una vez preparado las muestras húmedas y colocadas todas las muestras de bandejas Y1, Y2, Y3 se ingresa el rack con las muestras al horno para secado a temperatura que va desde los 90°C hasta los 110°C según sea el caso para cada tipo de muestra a analizar. Para las muestras 1,3,5,7 se procedió a secar a temperatura de 90°C mientras que para las muestras 2,4,6,8 se procedió a secar a 110°C.

5.2.2.2. Registro de Pesaje de Bandejas Secas.

Completado el primer tiempo de secado 4h, se retiró el rack de muestras del horno y se pesaron las bandejas en caliente, seguidamente se pesaron las muestras periódicamente cada 30 minutos a partir de las 4 horas de secado, para que se determine el punto final de secado de la muestra (punto donde no pierda más peso la muestra seca). Una vez registrado los pesos se regresa el rack con las bandejas al horno de secado para su posterior control de peso seco (30min o 0.5h), para comprobar que la muestra ha sido secada en su totalidad debe pasar 4h desde el ultimo pesaje en donde la muestra seca no perdió peso, hasta que dos determinaciones de pesos sucesivos de la muestra seca no sea diferente en más del 0.05% del peso inicial de la porción de ensayo. La diferencia entre el peso seco (m3) y peso seco constante (m4) debe ser menor que el 0.05% del peso húmedo como se indica en la siguiente ecuación (17):

$$PC: |m_3 - m_4| \leq \frac{0.05}{100} * (m_2 - m_1) \quad (17)$$

Donde:

PC: Peso constante

El criterio de condición de peso constante de aceptar o rechazar, obedece a la siguiente explicación como se muestra en la Figura 32.

Figura 32

Condición de peso constante

Ejemplo 1			Ejemplo 2		
$ m_3 - m_4 $	$\leq$	$0.05/100 * (m_2 - m_1)$	$ m_3 - m_4 $	$\leq$	$0.05/100 * (m_2 - m_1)$
1400.34 - 1400.46	$\leq$	$0.05/100 * (1500.02 - 400.36)$	1400.34 - 1401.46	$\leq$	$0.05/100 * (1500.02 - 400.36)$
0.12	$\leq$	0.55	1.12	$\leq$	0.55
Por lo tanto			Por lo tanto		
0.55 - 0.12			0.55 - 1.12		
0.43			-0.57		
El valor positivo 0.43 que muestra el LIMS, indica que la diferencia de masas secas está incluida (es menor) al 0.05% de la masa húmeda.			El valor negativo -0.57 que muestra el LIMS, indica que la diferencia de masas secas NO está incluida (es mayor) al 0.05% de la masa húmeda.		
Por lo tanto CUMPLE con la condición de peso constante			Por lo tanto NO CUMPLE con la condición de peso constante		

Una vez culminado todo el pesaje para cada muestra seca debe tener una diferencia de humedad $\leq 0.2\%$. Caso contrario la muestra es rechazada; el cálculo de la humedad se realizó según lo indicado en la siguiente ecuación:

$$\%h = \frac{100 * (m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} \quad (18)$$

Dónde:

m_1 = Peso de bandeja de secado, en gramos.

m_2 = Peso de bandeja de secado más muestras húmeda de concentrado, en gramos.

m_3 = Peso de bandeja de secado más la muestra seca de concentrado, en gramos.

5.2.3. *Cálculos Matemáticos para Determinar el Análisis de Humedad de las Muestras*

Para determinar el análisis de humedad de las muestras se realizó el cálculo matemático de la muestra 1 con 3 réplicas en bandejas Y1, Y2, Y3. se analizan las muestras 2, 3, 4, 5, 6, 7,8. respectivamente de la misma manera como se da a conocer en los siguientes puntos.

Peso de bandeja con papel kraft para codificación, Peso tara(m_1).

$$m_{1Y1} = 458.15$$

$$m_{1Y2} = 455.13$$

$$m_{1Y3} = 446.29$$

Peso de bandeja con muestra de concentrado húmedo, peso bruto húmedo (m_2).

$$m_{2Y1} = 1619.29$$

$$m_{2Y2} = 1616.46$$

$$m_{2Y3} = 1601.68$$

Se procede a colocar en el horno de secado por tiempo determinado a partir de las 4h y pesando periódicamente cada 30min, pasado el tiempo se retira y se pesa la muestra, peso bruto seco (m_3).

$$m_{3Y1} = 1507.01$$

$$m_{3Y2} = 1503.75$$

$$m_{3Y3} = 1490.01$$

Se vuelve a colocar en el horno de secado y según procedimiento se vuelve a pesar pasado las 4h desde el último tiempo registrado en el que no se tuvo más pérdida de peso, peso bruto seco constante (m_4).

$$m_{4Y1} = 1506.97$$

$$m_{4Y2} = 1503.78$$

$$m_{4Y3} = 1490.06$$

Una vez que se tienen todos los datos requeridos se procede a realizar los cálculos, primero se calcula la condición de peso constante según la ecuación (17).

Reemplazando los datos en la ecuación (17) tenemos para la bandeja Y1:

$$PC = |1507.01 - 1506.97| \leq \frac{0.05}{100} * (1619.29 - 458.15)$$

$$0.04 \leq 0.58$$

Reemplazando los datos en la ecuación (17) tenemos para la bandeja Y2:

$$PC = |1503.75 - 1503.78| \leq \frac{0.05}{100} * (1616.46 - 455.13)$$

$$0.03 \leq 0.58$$

Reemplazando los datos en la ecuación (17) tenemos para la bandeja Y3:

$$PC = |1490.01 - 1490.06| \leq \frac{0.05}{100} * (1601.68 - 446.29)$$

$$0.05 \leq 0.58$$

De la condición de peso constante PC se puede afirmar que para la bandeja Y1, Y2, Y3 si cumplen con la condición y secan a peso constante por lo tanto se procede a determinar el porcentaje de humedad según la ecuación (18).

Reemplazando los datos obtenidos para la bandeja Y1 tenemos que:

$$\%h = \frac{100 * (1619.29 - 1507.01)}{1619.29 - 458.15}$$

$$\%h = 9.67$$

Reemplazando los datos obtenidos para la bandeja Y2 tenemos que:

$$\%h = \frac{100 * (1616.46 - 1503.75)}{1616.46 - 455.13}$$

$$\%h = 9.71$$

Reemplazando los datos obtenidos para la bandeja Y3 tenemos que:

$$\%h = \frac{100 * (1601.68 - 1490.01)}{1601.68 - 446.29}$$

$$\%h = 9.67$$

Cálculo de la diferencia de humedad de la bandeja Y1, Y2, Y3:

Según (Instituto Nacional de la Calidad INACAL, 2016) la diferencia de humedad para concentrados de cobre deberá ser $\leq$ a 0.2% por lo tanto la diferencia de humedades de Y1, Y2, Y3 son $\leq$ 0.2% por lo tanto se acepta la condición.

Cálculo del promedio del porcentaje de humedad

$$\%HumedadY1,Y2,Y3 = \frac{9.67 + 9.71 + 9.67}{3}$$

$$\%HumedadY1,Y2,Y3 = 9.69$$

De los resultados obtenidos por los cálculos matemáticos se obtuvo la siguiente Tabla 6, en el cual se puede apreciar para todas las muestras con sus respectivas replicas y una correcta preparación y cumplimiento de la condición de peso constante (PC) también se puede apreciar que la diferencia de humedad para todos los casos no supera el 0.2%.

Tabla 6*Cálculos matemáticos para determinar el análisis de humedad de las muestras*

Muestra	Replicas	Peso Tara (m1)	Peso húmedo (m2)	Peso seco (m3)	Peso seco constante (m4)	Seca a peso constante	% Humedad	Dif. humedad $\leq 0.2\%$
1	Y1	458.15	1619.29	1507.01	1506.97	Si	9.67	Si
	Y2	455.13	1616.46	1503.75	1503.78	Si	9.71	Si
	Y3	446.29	1601.68	1490.01	1490.06	Si	9.67	Si
2	Y1	447.15	1607.51	1483.23	1483.24	Si	10.71	Si
	Y2	445.08	1603.63	1479.85	1479.87	Si	10.68	Si
	Y3	445.54	1629.42	1501.68	1501.62	Si	10.79	Si
3	Y1	463.93	1748.45	1631.26	1631.21	Si	9.12	Si
	Y2	437.65	1613.09	1505.02	1505.07	Si	9.19	Si
	Y3	461.08	1698.47	1586.23	1586.19	Si	9.07	Si
4	Y1	444.86	1733.28	1618.22	1618.27	Si	8.93	Si
	Y2	463.00	1767.49	1651.36	1651.4	Si	8.90	Si
	Y3	453.17	1741.62	1627.22	1627.2	Si	8.88	Si
5	Y1	446.14	1575.32	1464.51	1464.48	Si	9.81	Si
	Y2	466.04	1567.65	1460.12	1460.07	Si	9.76	Si
	Y3	448.21	1529.71	1424.04	1424.07	Si	9.77	Si
6	Y1	462.89	1545.34	1443.48	1443.45	Si	9.41	Si
	Y2	461.18	1578.08	1472.54	1472.5	Si	9.45	Si
	Y3	449.64	1552.76	1448.77	1448.71	Si	9.43	Si
7	Y1	461.49	1607.06	1493.6	1493.67	Si	9.90	Si
	Y2	459.23	1635.39	1518.85	1518.82	Si	9.91	Si
	Y3	447.03	1674.14	1553.18	1553.1	Si	9.86	Si
8	Y1	480.47	1681.38	1576.75	1576.55	Si	8.71	Si
	Y2	460.44	1663.03	1557.68	1557.62	Si	8.76	Si
	Y3	460.08	1645.12	1541.52	1541.49	Si	8.74	Si

5.2.4. Cálculos Matemáticos para Determinar el Tiempo de Análisis de Humedad de las***Muestras de Concentrado de Cobre***

A partir de los cálculos obtenidos en la sección anterior (5.2.3) y con ayuda de un cronometro se realizó el seguimiento y registro de los pesos secos para cada muestra del cual nos indica el tiempo de análisis de humedad en el que las muestras

secaron en su totalidad cumpliendo las condiciones de peso constante y la diferencia de humedad $\leq 0.2\%$ para cada muestra como se muestra en la siguiente Tabla 7.

Tabla 7

Cálculos para determinación de tiempo de análisis de humedad

Muestra	Replicas	Peso húmedo (m2)	Peso seco (m3)	Peso seco constante (m4)	Tiempo de secado en horas (h) a peso constante (PC)
1	Y1	1619.29	1507.01	1506.97	7
	Y2	1616.46	1503.75	1503.78	7
	Y3	1601.68	1490.01	1490.06	7
2	Y1	1607.51	1483.23	1483.24	6.5
	Y2	1603.63	1479.85	1479.87	6.5
	Y3	1629.42	1501.68	1501.62	6.5
3	Y1	1748.45	1631.26	1631.21	8
	Y2	1613.09	1505.02	1505.07	7.5
	Y3	1698.47	1586.23	1586.19	8
4	Y1	1733.28	1618.22	1618.27	7.5
	Y2	1767.49	1651.36	1651.4	7.5
	Y3	1741.62	1627.22	1627.2	7.5
5	Y1	1575.32	1464.51	1464.48	6
	Y2	1567.65	1460.12	1460.07	6
	Y3	1529.71	1424.04	1424.07	6
6	Y1	1545.34	1443.48	1443.45	5
	Y2	1578.08	1472.54	1472.5	5
	Y3	1552.76	1448.77	1448.71	5
7	Y1	1607.06	1493.6	1493.67	7
	Y2	1635.39	1518.85	1518.82	7
	Y3	1674.14	1553.18	1553.1	7.5
8	Y1	1681.38	1576.75	1576.55	6.5
	Y2	1663.03	1557.68	1557.62	6.5
	Y3	1645.12	1541.52	1541.49	6.5

5.2.5. Balance de Materia para las Muestras de Concentrado de Cobre

El balance de masa se realizó mediante el cálculo de la pérdida de peso de la muestra húmeda por liberación de vapor de agua durante la operación de secado del concentrado de cobre como se muestra en la figura Figura 33.

El balance de masa en la operación de secado para las 8 muestras con 3 réplicas Y1, Y2, Y3 se muestran en la siguiente Tabla 8.

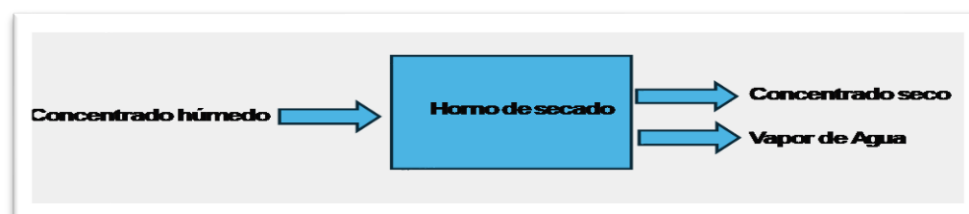
Tabla 8

Balance de masa para el secado de concentrado

Muestra	Replicas	Entrada	Salida	
		Concentrado húmedo (gr)	Concentrado seco (gr)	Vapor de agua liberada (gr)
1	Y1	1619.29	1507.01	112.28
	Y2	1616.46	1503.75	112.71
	Y3	1601.68	1490.01	111.67
2	Y1	1607.51	1483.23	124.28
	Y2	1603.63	1479.85	123.78
	Y3	1629.42	1501.68	127.74
3	Y1	1748.45	1631.26	117.19
	Y2	1613.09	1505.02	108.07
	Y3	1698.47	1586.23	112.24
4	Y1	1733.28	1618.22	115.06
	Y2	1767.49	1651.36	116.13
	Y3	1741.62	1627.22	114.40
5	Y1	1575.32	1464.51	110.81
	Y2	1567.65	1460.12	107.53
	Y3	1529.71	1424.04	105.67
6	Y1	1545.34	1443.48	101.86
	Y2	1578.08	1472.54	105.54
	Y3	1552.76	1448.77	103.99
7	Y1	1607.06	1493.6	113.46
	Y2	1635.39	1518.85	116.54
	Y3	1674.14	1553.18	120.96
8	Y1	1681.38	1576.75	104.63
	Y2	1663.03	1557.68	105.35
	Y3	1645.12	1541.52	103.60

Figura 33

Balance de masa para las muestras de concentrado de cobre



5.2.6. Balance de Energía para las Muestras de Concentrado de Cobre

- Cálculo de energía requerida para la evaporación del agua.

$$M_{H_2O} = m * H_i \quad (19)$$

- Cálculo de la energía requerida para la evaporación del agua.

$$Q_{evap} = M_{H_2O} * L_v \quad (20)$$

- Cálculo de la energía para calentar el concentrado de cobre.

$$Q_{calor} = m * C_p * \Delta T \quad (21)$$

- Cálculo de energía total requerida.

$$Q_{Total} = Q_{evap} + Q_{calor} \quad (22)$$

- Cálculo de potencia requerida.

$$P = Q_{Total} / t \quad (23)$$

Donde:

m: masa

H_i : humedad inicial

ΔT : variación de temperatura ($T_f - T_i$)

t: tiempo de secado

L_v : Calor latente de vaporización (2257 kJ/kg)

C_p : calor específico del agua (4.184 kJ/kg°C)

Cp: calor específico del cobre (0.385 kJ/kg°C)

A continuación, se realiza el cálculo del balance de energía para para una muestra de concentrado de cobre a temperatura de 90°C.

Datos:

$$m = 1575.32 \text{ g} = 1.575 \text{ kg}$$

$$H_i = 35\%$$

$$T_f = 90 \text{ °C}$$

$$T_i = 17 \text{ °C}$$

$$t = 10 \text{ h}$$

- Cálculo de masa de agua:

$$M_{H_2O} = 1.575 \text{ kg} * 0.35$$

$$M_{H_2O} = 0.551 \text{ kg}$$

- Cálculo de energía requerida para la evaporación de agua:

$$Q_{evap} = 0.551 \text{ kg} * 2257 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{evap} = 1243.07 \text{ kJ}$$

- Cálculo de energía para calentar el concentrado de cobre

$$Q_{calor} = 1.575 \text{ kg} * 0.385 \text{ kJ/kg°C} * (90 - 17) \text{ °C}$$

$$Q_{calor} = 44.71 \text{ kJ}$$

- Cálculo de la energía total requerida.

$$Q_{Total} = 1243.07 \text{ kJ} + 44.71 \text{ kJ}$$

$$Q_{Total} = 1287.78 \text{ kJ}$$

- Cálculo de potencia requerida.

$$P = 1287.78 \text{ kJ} / 10\text{h}$$

$$P = 128.78 \text{ kW}$$

A continuación, se realiza el cálculo del balance de energía para para una muestra de concentrado de cobre a temperatura de 110°C.

Datos:

$$m = 1575.32 \text{ g} = 1.575 \text{ kg}$$

$$H_i = 35\%$$

$$T_f = 110 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_l = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t = 10 \text{ h}$$

- Cálculo de masa de agua:

$$M_{H_2O} = 1.575 \text{ kg} * 0.35$$

$$M_{H_2O} = 0.551 \text{ kg}$$

- Cálculo de energía requerida para la evaporación de agua:

$$Q_{evap} = 0.551 \text{ kg} * 2257 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{evap} = 1243.07 \text{ kJ}$$

- Cálculo de energía para calentar el concentrado de cobre

$$Q_{calor} = 1.575 \text{ kg} * 0.385 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C} * (110 - 17) \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{calor} = 56.39 \text{ kJ}$$

- Cálculo de la energía total requerida.

$$Q_{Total} = 1243.07 \text{ kJ} + 56.39 \text{ kJ}$$

$$Q_{Total} = 1299.46 \text{ kJ}$$

- Cálculo de potencia requerida.

$$P = 1299.46 \text{ kJ} / 10\text{h}$$

$$P = 129.95 \text{ kW}$$

5.2.7. *Cálculo de Cinética de Secado para las Temperaturas de 90 °C y 110 °C*

La cinética de secado se determinó mediante el cálculo de la velocidad de secado en función del tiempo como indica en la ecuación (3) para los siguientes datos:

Temperatura de secado: 90 °C

Tiempo de secado total: 10 h

mh: masa de la muestra húmeda 1575.32 g

ms: masa de la muestra seca (g)

ΔT : Variación del tiempo de secado

M: Contenido de humedad en base húmeda

X: Contenido de humedad en base seca

ΔX : Variación del contenido de humedad en base seca

- A partir de la ecuación (4) se realiza el cálculo del contenido de humedad inicial y final en base húmeda:

$$M = \frac{mh - ms}{mh}$$

$$Mi = \frac{mhi - ms}{mh}$$

$$Mi = \frac{1575.32 - 1464.48}{1575.32}$$

$$Mi = 0.0704$$

$$Mi = 7.036\%$$

$$Mf = \frac{mh_f - ms}{mh}$$

$$Mf = \frac{1464.48 - 1464.48}{1575.32}$$

$$Mf = 0 \%$$

- A partir de la ecuación (7) se realiza el cálculo del contenido de humedad inicial y final en base seca:

$$X = \frac{M}{1 - M}$$

$$Xi = \frac{Mi}{1 - Mi}$$

$$Xi = \frac{0.0704}{1 - 0.0704}$$

$$Xi = 0.0757 \frac{gH2O}{g p.s}$$

$$Xf = \frac{Mf}{1 - Mf}$$

$$Xf = \frac{0}{1 - 0}$$

$$Xf = 0 \frac{gH2O}{g p.s}$$

- A partir de la ecuación (10) se calcula la variación de humedad en base seca:

$$\Delta X = [Xf - Xi]$$

$$\Delta X = [0.716 - 0.0757]$$

$$\Delta X = 0.0041 \frac{gH2O}{g p.s}$$

- Reemplazando la ecuación (3) se calcula la velocidad de secado en función del tiempo que es 0.5 h:

$$V = \frac{\Delta X}{\Delta T}$$

$$V = \frac{0.0041}{0.5}$$

$$V = 0.00820 \frac{gH2O}{g p.s * h}$$

A partir de todos los datos calculados de la velocidad de secado para una muestra de concentrado que es secado a una temperatura de 90 °C se muestra la Tabla 9.

Tabla 9

Cálculo de la velocidad de Secado para una temperatura de 90 °C

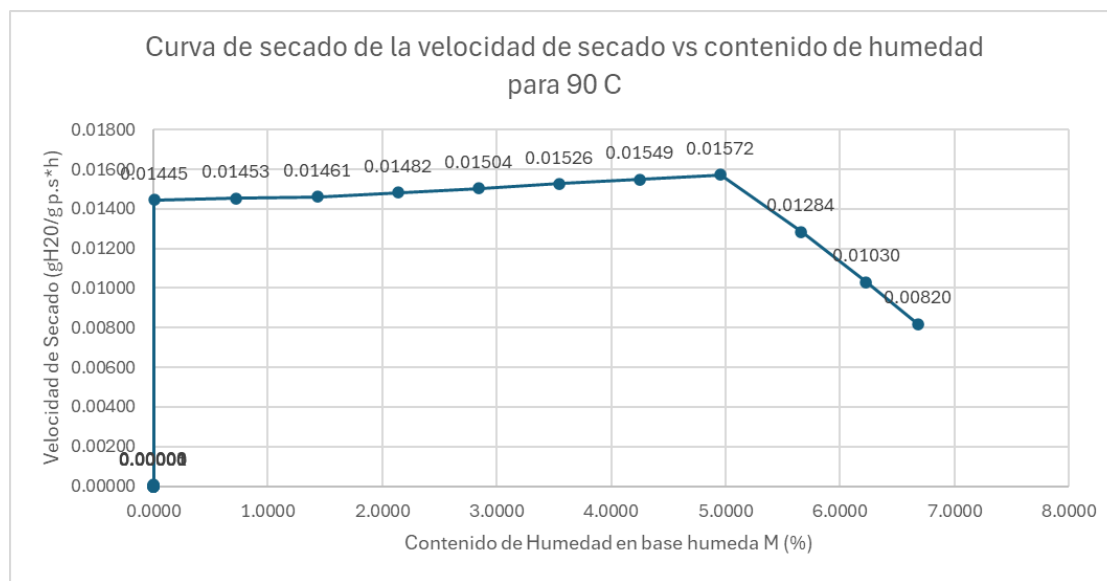
T (horas)	mh (g)	M	M (%)	X (gH2O/ gr p.s)	ΔX (gH2O/ gr p.s)	ΔT (h)	V (gH2O/ g p.s*h)
0	1575.32	0.0704	7.0360	0.0757			
0.5	1569.72	0.0668	6.6805	0.0716	0.0041	0.5	0.00820
1	1562.62	0.0623	6.2298	0.0664	0.0052	0.5	0.01030
1.5	1553.67	0.0566	5.6617	0.0600	0.0064	0.5	0.01284
2	1542.57	0.0496	4.9571	0.0522	0.0079	0.5	0.01572
2.5	1531.47	0.0425	4.2525	0.0444	0.0077	0.5	0.01549
3	1520.37	0.0355	3.5479	0.0368	0.0076	0.5	0.01526
3.5	1509.27	0.0284	2.8432	0.0293	0.0075	0.5	0.01504
4	1498.17	0.0214	2.1386	0.0219	0.0074	0.5	0.01482
4.5	1487.07	0.0143	1.4340	0.0145	0.0073	0.5	0.01461
5	1475.87	0.0072	0.7230	0.0073	0.0073	0.5	0.01453
5.5	1464.57	0.0001	0.0057	0.0001	0.0072	0.5	0.01445
6	1464.51	0.0000	0.0019	0.0000	0.0000	0.5	0.00008
6.5	1464.51	0.0000	0.0019	0.0000	0.0000	0.5	0.00000
7	1464.5	0.0000	0.0013	0.0000	0.0000	0.5	0.00001
7.5	1464.5	0.0000	0.0013	0.0000	0.0000	0.5	0.00000
8	1464.5	0.0000	0.0013	0.0000	0.0000	0.5	0.00000
8.5	1464.49	0.0000	0.0006	0.0000	0.0000	0.5	0.00001
9	1464.48	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5	0.00001
9.5	1464.48	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5	0.00000
10	1464.48	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5	0.00000

También a partir de la Tabla 9 se grafica la Figura 34 donde se puede apreciar cómo influye la velocidad de secado en el contenido de humedad del concentrado, en

donde se puede apreciar que la velocidad de secado llega un punto en el que no hay más pérdida de humedad y la velocidad de secado también llega a 0.

Figura 34

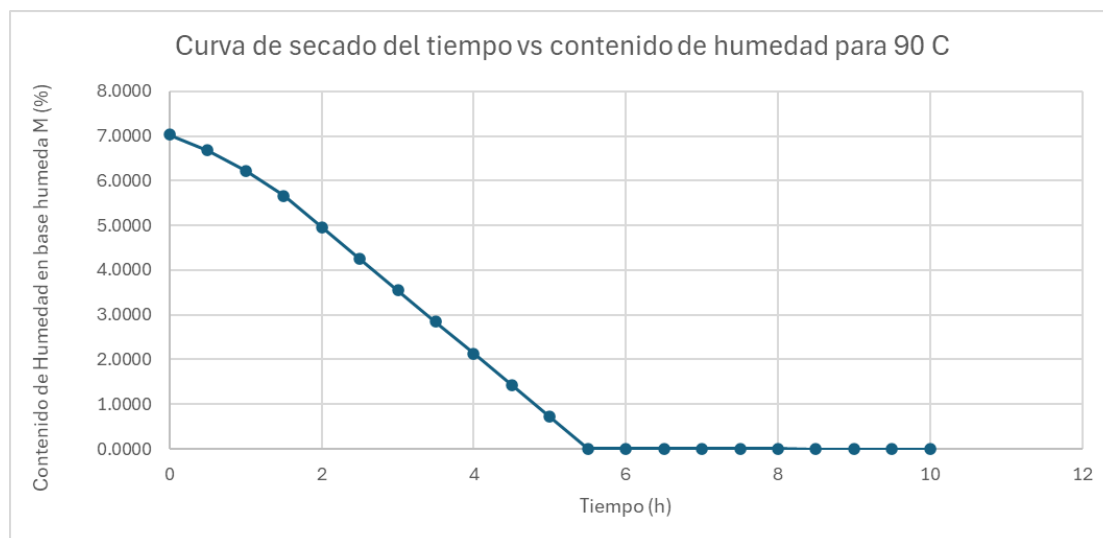
Curva de Velocidad de Secado para una muestra a 90 °C



También a su vez a continuación en la Figura 35 se puede apreciar cómo influye el tiempo en la velocidad de secado, se puede ver que la velocidad de secado decrece en función del tiempo hasta llegar a un punto en el que es constante, debido a que ya no hay más pérdida de vapor de agua, la muestra seca a un tiempo aproximado de 5.5h a 6h a una temperatura de 90 °C.

Figura 35

Curva de secado del tiempo vs contenido de humedad para 90 °C



Se calculó también la cinética de secado mediante el cálculo de la velocidad de secado a una temperatura de 110 °C para los siguientes datos:

Temperatura de secado: 110 °C

Tiempo de secado total: 10 h

mh: masa de la muestra húmeda 1545.34 g

ms: masa de la muestra seca (g)

ΔT : Variación del tiempo de secado

M: Contenido de humedad en base húmeda

X: Contenido de humedad en base seca

ΔX : Variación del contenido de humedad en base seca

- A partir de la ecuación (4) se realiza el cálculo del contenido de humedad inicial y final en base húmeda:

$$M = \frac{mh - ms}{mh}$$

$$Mi = \frac{mhi - ms}{mh}$$

$$Mi = \frac{1545.34 - 1443.45}{1545.34}$$

$$Mi = 0.0659$$

$$Mi = 6.5934\%$$

$$Mf = \frac{mhf - ms}{mh}$$

$$Mf = \frac{1443.45 - 1443.45}{1545.34}$$

$$Mf = 0 \%$$

- A partir de la ecuación (7) se realiza el cálculo del contenido de humedad inicial y final en base seca:

$$X = \frac{M}{1 - M}$$

$$Xi = \frac{Mi}{1 - Mi}$$

$$Xi = \frac{0.0659}{1 - 0.0659}$$

$$Xi = 0.0706 \frac{gH2O}{g p.s}$$

$$Xf = \frac{Mf}{1 - Mf}$$

$$Xf = \frac{0}{1 - 0}$$

$$Xf = 0 \frac{gH2O}{g p.s}$$

- A partir de la ecuación (10) se realiza el cálculo de la variación de humedad en base seca:

$$\Delta X = [X_f - X_i]$$

$$\Delta X = [0.0706 - 0.0661]$$

$$\Delta X = 0.0045 \frac{gH_2O}{g p.s}$$

- Reemplazando la ecuación (3) se calcula la velocidad de secado en función del tiempo que es 0.5 h:

$$V = \frac{\Delta X}{\Delta T} = \frac{0.0045}{0.5}$$

$$V = 0.00901 \frac{gH_2O}{g p.s * h}$$

Tabla 10

Cálculo de la velocidad de Secado para una temperatura de 110 °C

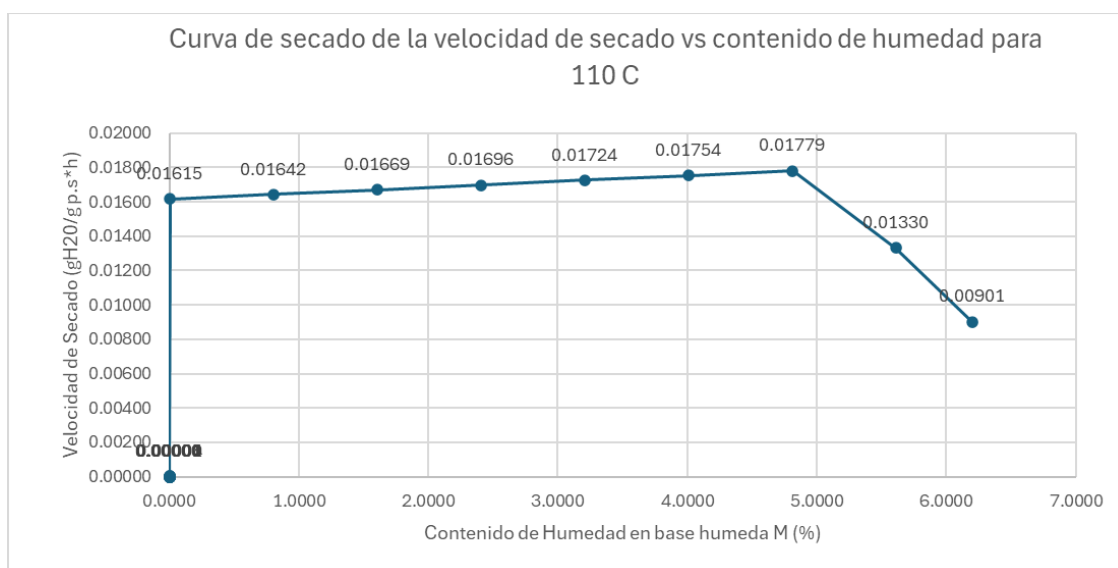
T (horas)	mh	M	M (%)	X (gH ₂ O/ g p.s)	ΔX (gH ₂ O/ g p.s)	ΔT (h)	V (gH ₂ O/g p.s*h)
0	1545.34	0.0659	6.5934	0.0706			
0.5	1539.24	0.0620	6.1986	0.0661	0.0045	0.5	0.00901
1	1530.14	0.0561	5.6098	0.0594	0.0067	0.5	0.01330
1.5	1517.79	0.0481	4.8106	0.0505	0.0089	0.5	0.01779
2	1505.41	0.0401	4.0095	0.0418	0.0088	0.5	0.01754
2.5	1493.03	0.0321	3.2084	0.0331	0.0086	0.5	0.01724
3	1480.65	0.0241	2.4072	0.0247	0.0085	0.5	0.01696
3.5	1468.27	0.0161	1.6061	0.0163	0.0083	0.5	0.01669
4	1455.89	0.0081	0.8050	0.0081	0.0082	0.5	0.01642
4.5	1443.51	0.0000	0.0039	0.0000	0.0081	0.5	0.01615
5	1443.48	0.0000	0.0019	0.0000	0.0000	0.5	0.00004
5.5	1443.48	0.0000	0.0019	0.0000	0.0000	0.5	0.00000
6	1443.48	0.0000	0.0019	0.0000	0.0000	0.5	0.00000
6.5	1443.47	0.0000	0.0013	0.0000	0.0000	0.5	0.00001
7	1443.46	0.0000	0.0006	0.0000	0.0000	0.5	0.00001
7.5	1443.45	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5	0.00001
8	1443.45	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5	0.00000
8.5	1443.45	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5	0.00000
9	1443.45	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5	0.00000
9.5	1443.45	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5	0.00000
10	1443.45	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5	0.00000

Todos los datos calculados para la velocidad de secado para una muestra de concentrado que es secado a una temperatura de 110 °C se muestran la Tabla 10.

A partir de la Tabla 10 se grafica la Figura 36 donde se puede apreciar cómo influye la velocidad de secado en el contenido de humedad del concentrado, en donde se puede apreciar que la velocidad de secado llega un punto en el que no hay más pérdida de humedad y la velocidad de secado también llega a 0.

Figura 36

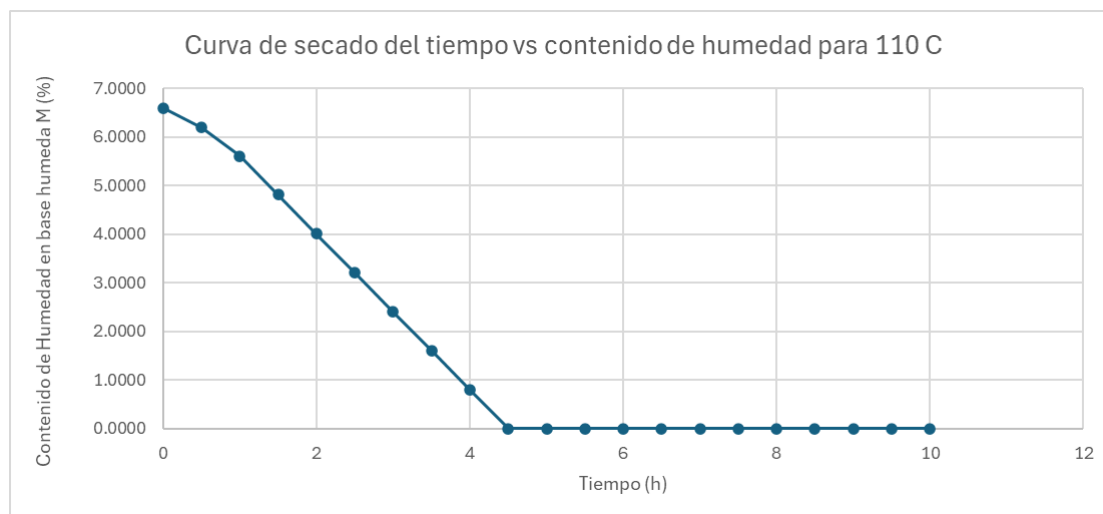
Curva de Velocidad de Secado para una muestra a 110 °C



También a su vez a continuación en la Figura 37 se puede apreciar cómo influye el tiempo en la velocidad de secado, se puede ver que la velocidad de secado decrece en función del tiempo hasta llegar a un punto en el que es constante, debido a que ya no hay más pérdida de vapor de agua, la muestra seca a un tiempo aproximado de 4.5h a 5h a una temperatura de 110 °C.

Figura 37

Curva de secado del tiempo vs contenido de humedad para 110 °C



Como ya se ha demostrado con los cálculos de cinética realizados, la velocidad de secado también influye con la variación de la temperatura de secado en función del tiempo de análisis de humedad por secado, a una temperatura de 90 °C la muestra presenta menor velocidad de secado y seca a 6h aproximadamente, mientras que a una temperatura de 110 °C la muestra presenta mayor velocidad de secado y seca a un tiempo aproximado de 5h.

5.3. Análisis Estadístico de Resultados

5.3.1. Análisis de las Pruebas de Humedad por Secado

La experimentación es una parte fundamental en la optimización del análisis de humedad por secado en concentrados de cobre. Con la experimentación se obtuvo información de calidad, la cual permite su procesamiento y análisis de esta información, para comprender mejor el secado de los concentrados de cobre, tomar decisiones sobre cómo mejorarlo e incrementar su calidad, así como, comprobar

hipótesis formuladas, ahorrando tiempo y recursos a la vez que se obtiene más información para encontrar la condición más optima.

Fernández (2020) comenta que esta experimentación ha sido empleada por técnicas estadísticas. Los análisis descriptivos y exploratorios de datos permitieron formular el problema, los objetivos y el planteamiento de la hipótesis. Con el diseño estadístico y el muestreo brindan la base para la recolección de datos. Este diseño también valida la información y la inferencia estadística. En tanto que, por medio de la contrastación de hipótesis, se obtuvieron inferencias inductivas válidas, para este propósito se aplicó el diseño de experimentos (DOE) habiendo planteado la secuencia necesaria que se debe seguir, como también el orden de estos, las que permitieron después de la experimentación recolectar y analizar la información. El Diseño de experimentos (DOE) aplicado fue el diseño factorial 2^3 con 3 réplicas, es decir, con 24 corridas.

Las variables tratadas fueron la temperatura de secado como factor A, peso de la muestra como factor B y pericia del analista como factor C, otras variables operativas se mantuvieron constantes. Vera B, Vera Ch (2018) indica que para el análisis de varianza se trabajó con un 95% de nivel de confianza, para el procesamiento de la información se hizo con dos softwares que fueron Minitab 19 y Excel donde se obtuvo todos los resultados finales (p. 67).

Se seleccionó los factores o variables independientes que son verificadas y son factores que pueden intervenir en el desempeño de la operación de secado, de esta manera se analiza los factores potenciales: temperatura de secado, peso de la muestra y la pericia del analista.

Para que las conclusiones del experimento tengan validez, precisión y amplio cubrimiento. El experimento debe llevarse a cabo teniendo en cuenta los tres principios fundamentales para cumplir con estas condiciones: repetición, aleatorización y control del error experimental:

5.3.1.1. Repetición.

Tres iteraciones en el experimento en el modelo DOE 2^3 de secado de los concentrados de cobre dará una mejor precisión en las estimaciones, de esta manera conseguir una medida de variabilidad.

5.3.1.2. Aleatorización.

Vera B, Vera Ch (2018) comenta que se ha considerado, diseños aleatorizados, durante la experimentación para cumplir con estos principios muy discutidos en la literatura, para cumplir los siguientes objetivos: “eliminar el sesgo en la estimación de medidas, dar validez a la estimación del error experimental, generar independencia de los errores experimentales, dar robustez al análisis.

5.3.1.3. Control del Error Experimental.

“Con la finalidad de evitar los efectos de los factores que se conocen sobre los resultados del experimento de secado, y no permiten observar minuciosamente los efectos bajo estudio. Este proceso se realiza mediante la construcción de bloques (tres iteraciones, veinticuatro experimentos) sometidos a la aleatorización” (Fernández, 2020).

Los experimentos se realizaron mediante diseño factorial simple a dos niveles 2^3 completo de 24 corridas, en tres iteraciones, cada iteración 8 corridas. El proceso del experimento consiste en realizar pruebas experimentales que generan cambios en la operación de secado en el despacho de concentrado de cobre; para determinar si factores seleccionados A (temperatura

de secado), B (peso de la muestra) y C (pericia del analista) son significativos y seguidamente encontrar una combinación de niveles donde el tiempo de análisis de humedad del concentrado de cobre sea mínima requerida.

5.3.2. *Modelo Estadístico Experimental*

En un diseño (2^3) de 8 experimentos y tres iteraciones, presenta una interacción de tercer orden, ABC que ha sido evaluada y lo cual puede dar uso para examinar otras interacciones de segundo orden como AB, BC, AC, y ABC; entonces diseño factorial con veinte cuatro pruebas experimentales es de utilidad para:

- Hacer posible detectar numéricamente diferencias o semejanzas reales.
- Las metodologías particulares del diseño 2^3 están perfectamente establecidas, es posible comparar experimentos análogos.
- Las inferencias se hacen sobre bases medibles de los veinte cuatro experimentos dentro de una probabilidad aceptable.
- El diseño experimental 2^3 está enfocados para obtener la máxima información con un mínimo de costo y a un tiempo menor.

El modelo 2^3 , permite alcanzar lo planificado en el diseño de investigación.

Según Gutiérrez, De la Vara (2012) definen el modelo estadístico utilizado es lineal para posibilitar el análisis de datos experimentales (p. 80) mediante la siguiente ecuación:

$$Y_{ijk} = f(A, B, C, AB, AC, BC, ABC,) + \epsilon_{ijk} \quad (24)$$

Donde:

A, B, C = Factores principales

AB, AC, BC = Factores de interacción dobles

ABC = Factor de interacción triple

ϵ_{ijk} = Error aleatorio ijk -ésimo (agrupa a los demás factores no controlados en el experimento).

Vera B, Vera Ch (2018) comenta que la correcta aplicación del modelo implica ajustarse a algunas suposiciones básicas:

- Como se advierte en el modelo, el efecto de los tratamientos es aditivo y la suma de los efectos de todos los tratamientos es igual a cero.
- Las muestras provienen de poblaciones normales, en este caso de los despachos del concentrado de cobre de la Compañía Minera Antapaccay las que tienen varianzas idénticas.
- Los errores (ϵ_{ijk}) están distribuidas normalmente con media cero y una varianza común”.

5.3.3. *Diseño Factorial*

El diseño 2^k es usado por que el experimento tiene unidades experimentales homogéneas, y la variación entre ellas es muy reducida. Tal es el caso de la optimización del análisis de humedad por secado del concentrado de cobre. De acuerdo con el cual, el conjunto de tratamientos analizados constituye toda la población y las inferencias conseguidas de los resultados son válidas sólo para esta población o experimento.

k : 3 factores o variables del experimento (temperatura de secado, peso de la muestra y pericia del analista).

2: Niveles cada uno (mínimo, máximo).

3×2^3 : 24 tratamientos (tres iteraciones).

5.3.4. Construcción de la matriz de diseño

Montgomery (2004) define que para poder utilizar el diseño factorial 2^3 se realizan las combinaciones posibles entre los factores, por consiguiente, se crea la matriz de diseño, en ella se da uso de un nivel menor y otro nivel mayor de un factor y se ejecuta como se observa en la Tabla 11, donde se observa “las variables independientes y son aquellas cuyo valor no dependen de otras variables. Las variables independientes están con sus unidades y sus correspondientes niveles, el modelo seleccionado es adecuado para la verificación de la hipótesis de investigación.

La relación que determina los valores que deben tomar los factores en cada experimento se conoce como matriz de diseño.

Tabla 11

Factores y niveles codificados de las variables independientes

VARIABLE	Unidad	Niveles	
		(mínimo)	(máximo)
A = Temperatura de secado	°C	90	110
B = Peso de la muestra	kg	10	20
C = Pericia del analista	P - E	0	1

Tabla 12*Planificación del diseño factorial en escala natural*

Yates	Símbolos formulada para efectos								Y (h)		
	I	A	B	C	AB	AC	BC	ABC			
(1)	+	–	–	–	+	+	+	–	Y ₁₁	Y ₂₁	Y ₃₁
a	+	+	–	–	–	–	+	+	Y ₁₂	Y ₂₂	Y ₃₂
b	+	–	+	–	–	+	–	+	Y ₁₃	Y ₂₃	Y ₃₃
ab	+	+	+	–	+	–	–	–	Y ₁₄	Y ₂₄	Y ₃₄
c	+	–	–	+	+	–	–	+	Y ₁₅	Y ₂₅	Y ₃₅
ac	+	+	–	+	–	+	–	–	Y ₁₆	Y ₂₆	Y ₃₆
bc	+	–	+	+	–	–	+	–	Y ₁₇	Y ₂₇	Y ₃₇
abc	+	+	+	+	+	+	+	+	Y ₁₈	Y ₂₈	Y ₃₈

Esta matriz está construida con tres réplicas, es decir se obtiene más de una respuesta para cada combinación, en este caso hay que tener en claro las tres interacciones, ver Tabla 12.

La variable respuesta (criterio de optimización) es minimizar el tiempo de análisis de humedad por secado de las muestras de concentrado de cobre, ya que el tiempo empleado actualmente está generando demoras en los reportes de humedad, afectando el tiempo de los turnos de trabajo, produciendo un excesivo consumo energético, menor disponibilidad de los hornos de secado, el cual da a conocer los valores de las variables en escala codificada (Xi) y escala natural (A, B, C) siendo el tiempo de análisis de humedad por secado del despacho de concentrado de cobre (Y).

Tabla 13*Matriz del diseño factorial, en escala natural y codificada*

Yates	Escala						Y (h)		
	Codificada			Natural					
(1)	-1	-1	-1	90	10	0	7	7	7
A	1	-1	-1	110	10	0	6.5	6.5	6.5
B	-1	1	-1	90	20	0	8	7.5	8
Ab	1	1	-1	110	20	0	7.5	7.5	7.5
C	-1	-1	1	90	10	1	6	6	6
Ac	1	-1	1	110	10	1	5	5	5
Bc	-1	1	1	90	20	1	7	7	7.5
Abc	1	1	1	110	20	1	6.5	6.5	6.5

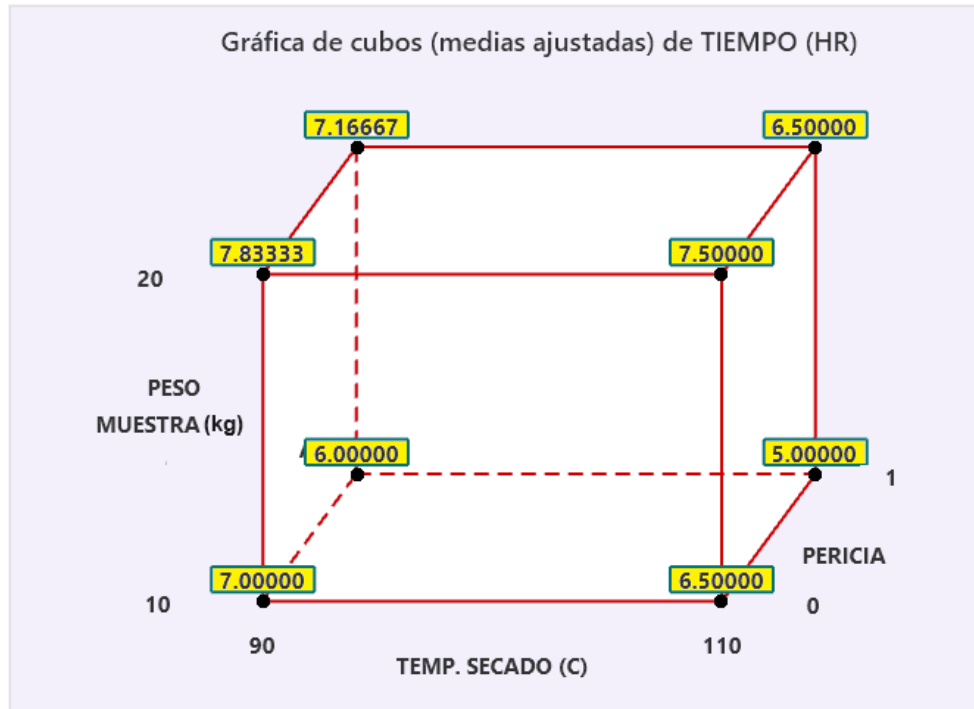
Según la Tabla 13, Gutiérrez, De la Vara (2012) comentan que se refleja la relación de condiciones experimentales para realizar el diseño 2^3 , nótese que no existe ninguna condición repetida ni tampoco falta una posible combinación, para los cálculos estadísticos y las correspondientes predicciones de optimización se ha utilizado la escala natural para la matriz de diseño factorial con 3 variables predictoras (A, B y C) (p. 101).

5.3.5. *Representación Geométrica de las Combinaciones*

La experimentación con las variables consiste en realizar pruebas experimentales que generan cambios en el tiempo de análisis de humedad intencionada, de esta forma se podrán observar cambios en la variable dependiente a la salida de la operación de secado de los concentrados de cobre.

Figura 38

Cubo de combinación de los factores A,B,C



Para definir si los factores seleccionados (A, B y C) son importantes y posteriormente localizar una combinación de niveles donde el tiempo de análisis de humedad sea mínima, se decidió correr un diseño factorial 2^3 con tres replicas para ver las combinaciones de las afirmaciones expuestas, se muestra el cubo que asocia a las combinaciones de los factores, en el cubo (ver Figura 38) se muestran las combinaciones en sus vértices el tiempo de análisis de humedad por secado.

La figura anterior da a conocer una zona experimental cubica con ocho vértices, representando a ocho tratamientos, que concuerdan con la combinación de Yates para el diseño factorial 2^3 .

5.3.6. *Variables Involucradas*

Los datos están ordenados para el diseño factorial completo 2^3 con tres replicas para analizarlo y minimizar el tiempo de análisis de humedad por secado (Y) de los minerales sulfurados de cobre como Calcopirita, Bornita, Calcosina, Covelina y Enargita; cuyo producto final es el concentrado de cobre con una ley promedio de 35% de Cu provenientes del yacimiento minero Antapaccay – Espinar - Cusco.

En la operación de secado se observan flujos de materiales, uso de equipos, herramientas y flujos energéticos, con el propósito de minimizar el tiempo de análisis de humedad del concentrado de cobre. Para alcanzar estos propósitos, se utilizan a las variables controlables en laboratorio experimental, al respecto Fernández (2020) comenta que como resultado de la combinación de los factores es que se generan productos que deben ser sometidos a pruebas de hipótesis y validar sus objetivos.

5.3.6.1. **Factores Controlables.**

Los factores del proceso son cuantitativas y cualitativas se encargan de regentar la operación de secado de los concentrados de cobre, cuyos cambios de valor son anotados en tablas de recolección de datos para dar a conocer las condiciones del tiempo mínimo de análisis de humedad, y son las siguientes:

A: Temperatura de secado de 90 °C y 110 °C

B: Peso de la muestra de 10 kg y 20kg

C: Pericia del analista es de Principiante (0) y Experimentado (1)

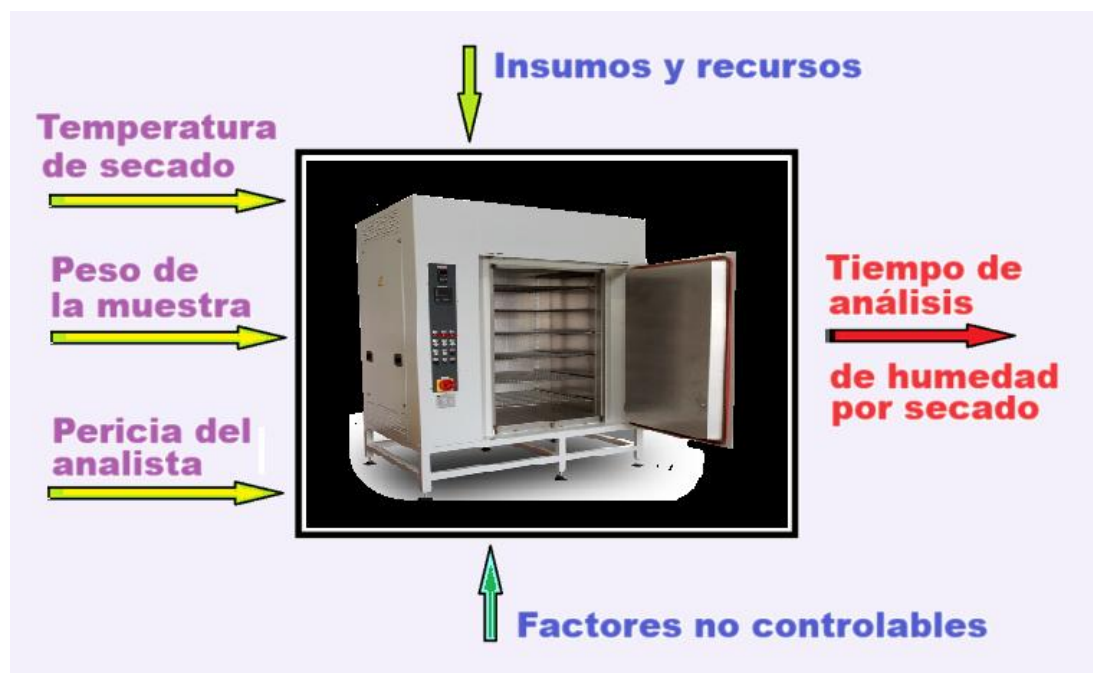
5.3.6.2. Variable de Interés.

Es la variable que agrupa a los datos registrados como consecuencia de la operación de secado es:

Y: Tiempo de análisis de humedad por secado en horas (h).

Figura 39

Caja negra para la operación de secado de concentrado de cobre



La operación de secado del concentrado visto como una caja negra; en ella se observan flujos de variables controladas, con el propósito mejorar la operación o la minimización del tiempo de análisis de humedad por secado. Fernández (2020) indica que para obtener estos propósitos, se recurren a los diseños experimentales, en que se utilizan a las variables controlables en laboratorio experimental o planta piloto, al respecto, se observa la Figura 39.

5.3.7. *Contrastación de Hipótesis*

Enunciada la hipótesis de investigación, seguidamente se formula la hipótesis estadística, cabe mencionar, que la hipótesis estadística con la finalidad de analizar los datos obtenidos en el laboratorio de análisis de humedad por secado de Antapaccay, con la finalidad de probar o rechazar la hipótesis nula.

La hipótesis de investigación es: La optimización del tiempo de análisis de humedad por secado de las muestras del despacho de concentrado de cobre de Antapaccay es influenciada por la variación de la temperatura de secado, peso de la muestra y pericia del analista. Los resultados a obtenerse muestran que esta hipótesis ha sido contrastada favorablemente. Para eso formulamos las siguientes hipótesis:

Hipótesis de investigación para la temperatura de secado:

$$H_o: \mu_A = 0 \quad (25)$$

$$H_A: \mu_A \neq 0$$

Hipótesis de investigación para el peso de la muestra:

$$H_o: \mu_B = 0 \quad (26)$$

$$H_A: \mu_B \neq 0$$

Hipótesis de investigación para la pericia del analista:

$$H_o: \mu_C = 0 \quad (27)$$

$$H_A: \mu_C \neq 0$$

Fernández (2020) define que esta experimentación de la operación de secado de los concentrados de cobre dentro del proceso científico esta asistida por técnicas estadísticas. Los análisis descriptivos y exploratorios de datos nos dan la base a la verificación de los problemas y el planteamiento de la hipótesis. Además, por medio de contrastación de hipótesis, estimaciones y conclusiones se obtienen inferencias inductivas válidas.

5.3.8. *Modelo Matemático del Criterio de Optimización*

Como se mencionó, muchos de los procesos en metalurgia, donde el proceso es complejo del tipo caja negra (ver Figura 39) puede ser escrito a través de un modelo empírico de la siguiente manera:

$$F = \emptyset (A, B, C, Z) \quad (28)$$

O también de la forma siguiente:

$$Y = \emptyset (X_1, X_2, X_3, \epsilon) \quad (29)$$

$F=Y$: Criterio de optimización

$A, B, C, Z, X_1, X_2, X_3$: Variables independientes

Z, ϵ : Componente del error aleatorio

El hecho de que se puedan estimar los contrastes de los factores del experimento. Se jerarquiza a los contrastes por orden de importancia, resultado a partir de los efectos, con veinte cuatro tratamientos y siete contrastes ortogonales. Cabe mencionar los factores involucrados son cuantitativos y uno es cualitativo. En la Tabla

13, la disposición de los signos es consecuencia de la disposición según la notación de Yates, a partir de los contrastes se obtendrán los componentes de la tabla de ANOVA

Vera B, Vera Ch. (2018) comentan que cada contraste responde a la pregunta: ¿Los factores tienen efecto alguno en el tiempo de análisis de humedad por secado de los concentrados de cobre? La respuesta a esta pregunta se da al examinar los siete valores de los contrastes ortogonales, calculados mediante el programa Minitab 19: en español, la herramienta de analizar diseño factorial 2³. La respuesta que proporciona el software es en tablas y gráficos. Para un porcentaje de error del 5 % (p. 37).

5.3.9. *Determinación y Análisis de los Efectos Significativos*

Analizando los resultados supuestos del Experimento factorial (2³) vamos a dar a conocer los efectos principales y simples de los factores intervinientes, el efecto de la interacción y la medida de estos efectos. Según Fernández (2020) el efecto de los factores puede ser interpretado de dos formas la primera es una gráfica normal de los efectos y la segunda es una gráfica de Pareto de los efectos.

5.3.9.1. Cálculo de los efectos.

Obteniendo los contrastes, el siguiente paso es determinar los efectos principales y de interacción. Inga (2020) comenta que el cálculo de efectos nos permitirá determinar cuánto afecta las variables independientes en la variable dependiente. Los efectos se definen entre la diferencia de los valores medios de las respuestas, cuando en el proceso las variables participantes se encuentren en su nivel más bajo y alto, calculamos como sigue (p.80): De los cálculos efectuados, se aprecia en la Tabla 14, que, el efecto de la variable B, C, y la interacción B*C dan a conocer las óptimas condiciones para minimizar la función algebraica de la ecuación de regresión de la variable dependiente respecto a las independientes (valor

absoluto). Revisando los productos de los tratamientos, el que genera mayor reducción del tiempo de análisis de humedad por secado es el peso de la muestra y la pericia del analista, así como la interacción de ellas, en forma simultánea.

Tabla 14

Efecto de las variables principales y sus interacciones

Término	Efecto	Valor T	Valor p
Constante		226.98	0.000
A: TEMP. SECADO	-0.6250	-10.61	0.000
B: PESO MUESTRA	1.1250	19.09	0.000
C: PERICIA	-1.0417	-17.68	0.000
A*B: TEMP. SECADO *PESO MUESTRA	0.1250	2.12	0.050
A*C: TEMP. SECADO *PERICIA	-0.2083	-3.54	0.003
B*C: PESO MUESTRA *PERICIA	0.2083	3.54	0.003
A*B*C: TEMP. SEC.*PESO MUES.*PERICIA	0.0417	0.71	0.490

Para conocer cuantitativamente la cantidad que afectan las variables sobre la respuesta o criterio de optimización del proceso se resuelve el cálculo de los efectos según se observa en la Tabla 14, los factores A, B y C optimizan el proceso, así como la interacción de las mismas, y están respectivamente respaldadas por sus valores “*p*” cuyo valor es ≤ 0.05 .

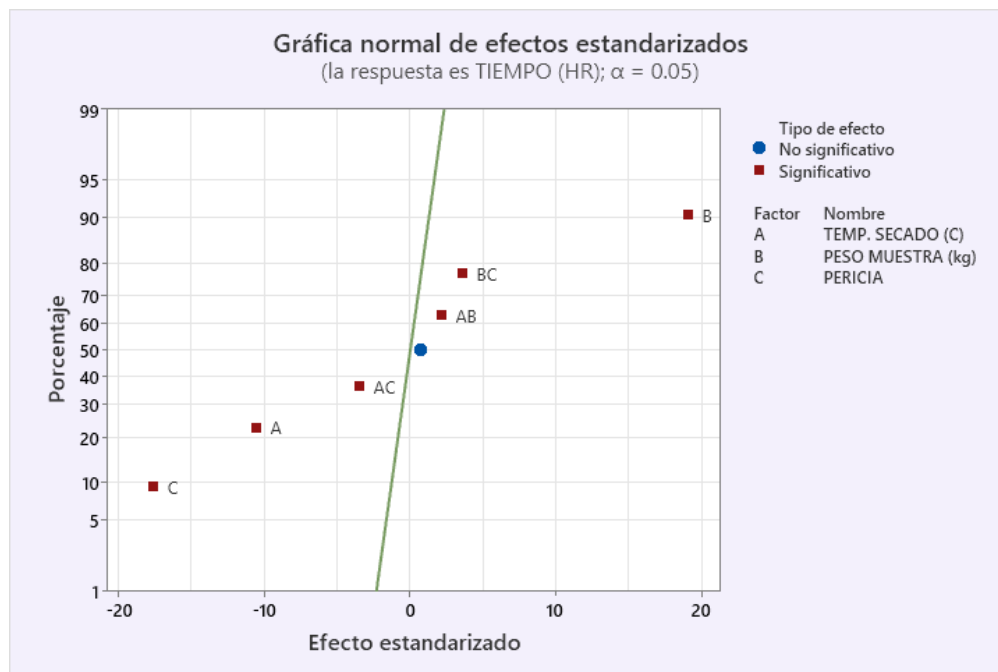
5.3.9.2. Gráfica Normal de los Efectos.

Montgomery (2004) afirma que la gráfica normal de los efectos nos sirve para comparar la importancia de cada uno de los efectos principales y de sus interacciones para el diseño experimental 2^3 . La línea que se observa en el gráfico es llamada la línea ajustada, esta nos

indica donde se esperaría que se situaran los puntos de los efectos si estos fueran cero (p. 111). Gutiérrez, De la Vara (2012) indica que en la gráfica los efectos importantes de los factores son presentados en puntos de color rojo con su respectiva denominación, cada punto corresponde a un efecto, los efectos que carecen de significancia en el diseño experimental son mostrados en puntos de color negro, también, se observa que los valores de A, C y AC están a la izquierda de la línea de ajuste mostrando efecto significativo también a su vez la variable B, BC y AB presentan significancia para la optimización (p. 97).

Figura 40

Gráfica normal de efectos de secado de concentrados de cobre

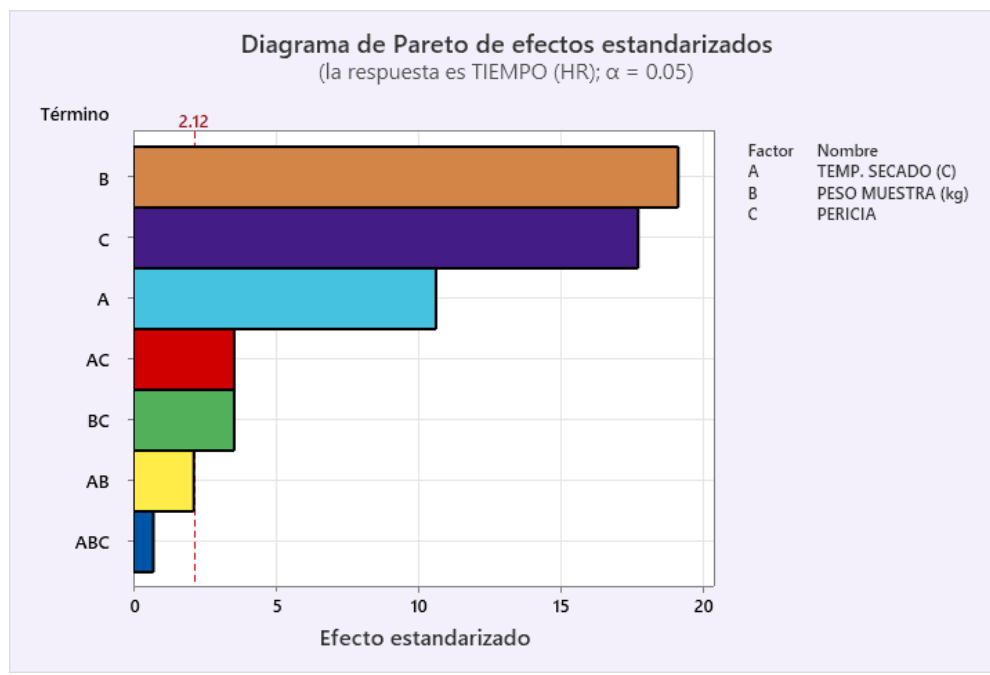


5.3.9.3. Gráfica de Pareto de los Efectos.

Según Gutiérrez, De la Vara (2012) afirman que la gráfica de Pareto de los efectos al igual que la gráfica normal de los efectos nos sirve para conocer los efectos importantes en un diseño experimental. En esta gráfica los efectos importantes de los factores son todas aquellas barras que sobrepasan la línea vertical de color rojo llamada línea de referencia.

Figura 41

Diagrama de Pareto de los efectos, con un error de 5%



Vera B., Vera Ch. (2018) comentan que el diagrama de Pareto se muestra por orden, de mayor a menor efecto, los factores o combinaciones. Los factores que superan la franja roja son los denominados factores significativos, se deben de tener en cuenta los valores que tienen mayor efecto para la condición de minimización del tiempo de análisis de humedad por secado que el resto a pesar de no llegar a ser importantes para la minimización.

Además, como se muestra en la Figura 41, se puede observar que el efecto más grande es (B) peso de la muestra del concentrado de cobre porque es el que más se extiende. El efecto para la interacción (ABC) temperatura de secado - peso de la muestra – pericia del analista, es el más pequeño porque es el que menos se extiende.

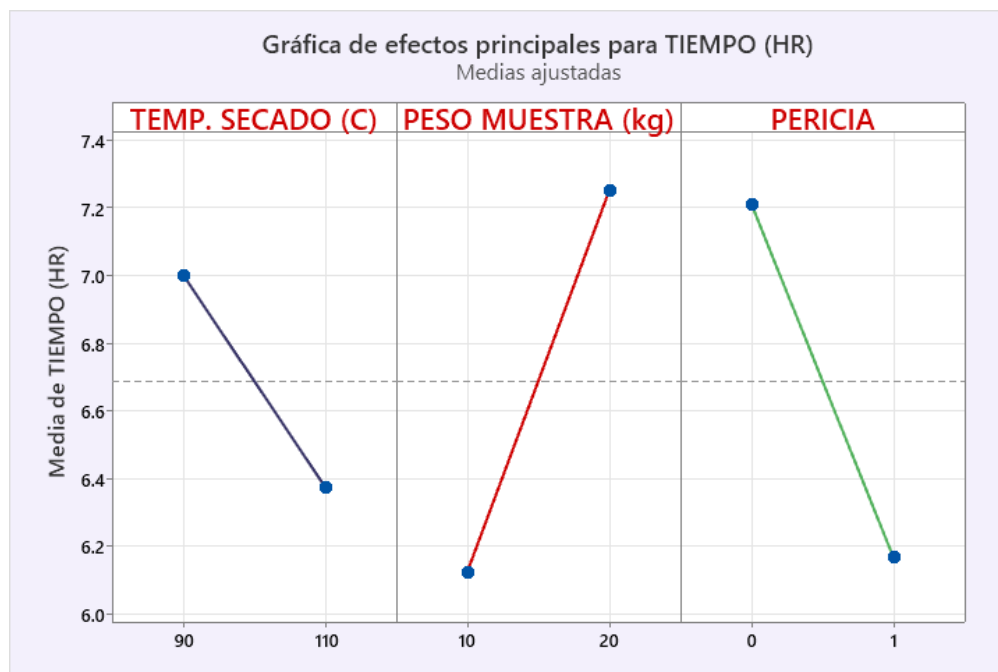
5.3.9.4. Efecto de los Parámetros Operativos Estudiados y sus Interacciones.

La operación de secado de los concentrados de cobre funciona muy bien para la temperatura de 110 °C, para un peso de la muestra de 10 kg, y cuando el analista es experimentado como

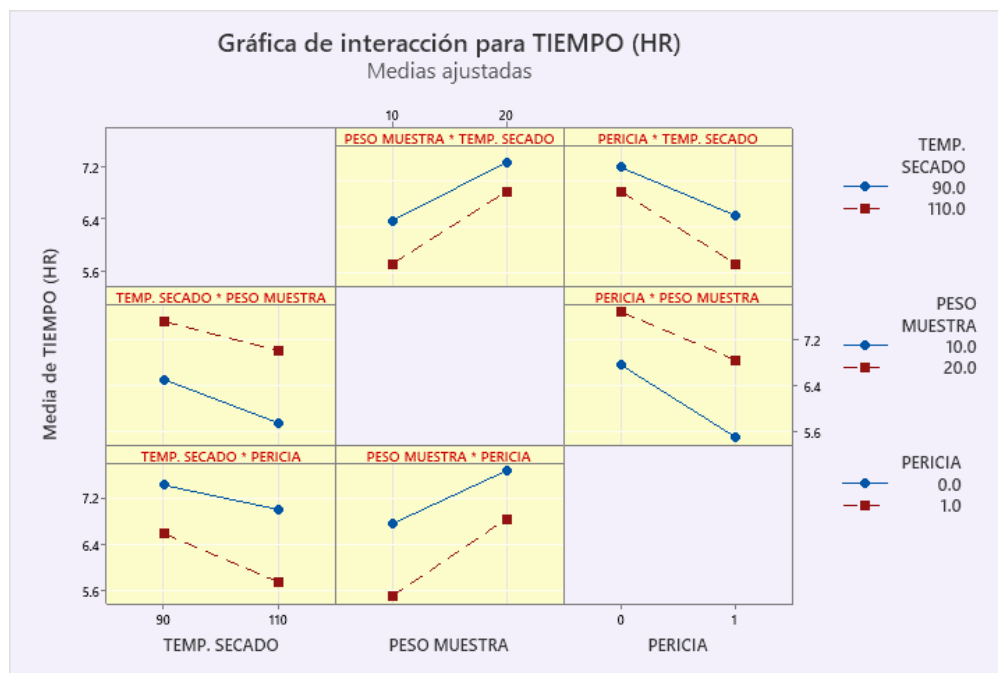
efectivamente muestra la Figura 42, ya se puede observar cómo minimizar el tiempo de análisis de humedad por secado.

Figura 42

Efecto de los factores



Como indican Gutierrez, De la Vara (2012) seguidamente estimamos efectos para cada una de las interacciones de los factores y vemos los valores para cada uno de estos factores AB, AC, BC y ABC, para estimar sus niveles, que deben ser mejorados, y colocados en sus rangos de importancia (p. 112).

Figura 43*Efecto de las interacciones de los factores***5.3.9.5. Significancia de los Efectos.**

Durante la experimentación el valor de un factor cambia de un nivel bajo a un nivel alto, se aprecia su efecto sobre el proceso, para la presente investigación, la operación de secado de los concentrados de cobre, se realiza el análisis factorial, teniendo en cuenta lo siguiente, que las réplicas de todos los puntos de diseño, (en la experimentación se efectuaron tres replicas) producen mayor sostenibilidad para el análisis por diseño experimental.

El tipo de término que se interpreta depende de si un término del modelo es estadísticamente significativo. Las siguientes interpretaciones se pueden encontrar en la Figura 43 y estas son:

- Si un coeficiente de un factor es significativo, para fines de la minimización, se encuentra en el nivel más bajo.
- No se observa la significancia en términos de interacción

5.3.9.6. Contribución de los Efectos.

5.3.9.6.1. Efecto A: Temperatura de Secado del Concentrado.

Es muy relevante para la operación de secado, los análisis muestran que es un agente minimizador del tiempo de análisis, su incremento de 90 °C a 110 °C hace que se deprima el tiempo de análisis de humedad.

5.3.9.6.2. Efecto B: Peso de la Muestra del Concentrado.

El signo positivo del efecto del peso de la muestra es típico de condición adecuada para el secado del concentrado, como se ve cuando se incrementa de 10 kg a 20 kg en el efecto se observa una pendiente positiva, es decir, También, se observa que conviene trabajar con pesos reducidos.

5.3.9.6.3. Efecto C: Pericia del Analista.

Esta relación tiene un efecto negativo ya que se optimiza cuando el analista es experimentado, entonces; es importante que los analistas sean experimentados para posibilitar la minimización de tiempo de análisis de humedad por secado.

Considerando los valores de efectos obtenidos en Minitab 19, se encuentra las contribuciones porcentuales de cada uno de los factores que intervienen en el proceso de secado de los concentrados de cobre. Según la Tabla 15, se observa que los efectos en orden de importancia en valor absoluto para la optimización son de los factores: B, C y A y las interacciones: AC, BC y AB, interacción ABC produce un efecto ínfimo. Es importante poner mayor atención en los factores principales.

Tabla 15*Contribución porcentual de los efectos*

Factor	Estimación del efecto		Contribución porcentual
	Valor natural	Valor absoluto	
<i>A</i>	-0.6250	0.6250	18.5
<i>B</i>	1.1250	1.1250	33.3
<i>C</i>	-1.0417	1.0417	30.9
<i>AB</i>	0.1250	0.1250	3.7
<i>AC</i>	-0.2083	0.2083	6.2
<i>BC</i>	0.2083	0.2083	6.2
<i>ABC</i>	0.0417	0.0417	1.2
TOTAL		64.085	100

5.3.10. Cálculo y Análisis de Varianza

Vera B., Vera Ch. (2018) afirman que hoy en día una de las técnicas experimentales o métodos de análisis más usado es el análisis de varianza, ya que significa la suma de los cuadrados de las desviaciones respecto a la media, constituye la base de los diseños experimentales. El análisis de varianza (ANOVA), calcula la variación total, considerando a todas las variables incluidas en la experimentación de secado del concentrado de cobre, que afectan a las variables consideradas.

5.3.11. Grados de Libertad del Diseño Experimental

El total de grados de libertad (GL) es un valor menos 1 de la cantidad de tratamientos en la muestra (ver Tabla 16). “El análisis utiliza esa información para estimar los valores de parámetros de población desconocidos. Los GL de un término muestran qué tanta información usa ese término, para estimar la variabilidad de las estimaciones de los parámetros” (Soporte de Minitab 18, 2021) se resume en la siguiente Tabla 16:

Tabla 16

Total de grados de libertad del modelo factorial

Factor de variabilidad	Grados de libertad	
	Formula	Valor
A: TEMP. SECADO	$(a-1)$	1
B: PESO MUESTRA	$(b-1)$	1
C: PERICIA	$(c-1)$	1
A*B: TEMP. SECADO *PESO MUESTRA	$(a-1)*(c-1)$	1
A*C: TEMP. SECADO *PERICIA	$(a-1)*(c-1)$	1
B*C: PESO MUESTRA *PERICIA	$(b-1)*(c-1)$	1
A*B*C: TEMP. SEC.*PESO MUES.*PERICIA	$(a-1)*(b-1)*(c-1)$	1
ERROR	$a*b*c*(n-1)$	16
TOTAL	N-1	23

Fernández (2020) afirma que el procedimiento nos da a conocer la significancia de los efectos, para calcular la variabilidad total en función de la suma de cuadrados de los efectos y del error recurrimos a la siguiente igualdad:

$$SS_T = SS_{efectos} + SS_{error} \quad (30)$$

Donde:

SS_T = Suma total de los cuadrados corregidos.

$SS_{efectos}$ = Suma de los cuadrados de los efectos (tratamientos).

SS_{error} = Suma de cuadrados por el error aleatorio.

5.3.12. Análisis y Cálculo de los Cuadrados Medios

Según Zapata (2020) el factor de la suma de cuadrados medios es la desviación de la media del nivel de factor estimado alrededor de la media general. Esto se conoce también como la suma de los cuadrados entre los tratamientos (p. 55).

Vera B., Vera Ch. (2018) afirman que las sumas de cuadrados de las fuentes de variabilidad (A, B, C, AB, AC, BC Y ABC) se determina a partir de los efectos, teniendo en cuenta que cada efecto tiene un solo grado de libertad igual a 1 por tener únicamente dos niveles de variación para el diseño experimental de optimización del tiempo de análisis de humedad, el criterio en la comparación de la variabilidad es una prueba con el estadístico F. En tanto se ha desarrollado una serie de secuencias que incluyen primero la determinación de los grados de libertad para cada una de las variables de esta experimentación (p. 57).

5.3.12.1. Suma de Cuadrados Totales.

Como indica Montgomery (2004) la definición de la suma de cuadrados totales nos da a conocer la importancia de los efectos, para calcular la variabilidad total en función la suma de cuadrados de los efectos y del error, recurrimos a la siguiente igualdad:

$$SS_T = SS_{efectos} + SS_{error} \quad (31)$$

En ANOVA, la suma cuadrados total, nos indica que la variación total puede atribuir a otros factores, para nuestro diseño factorial 2^3 con tres replicas, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$SS_T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^3 y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{8 * n} \quad (32)$$

Donde:

y_{ijk} = Resultado promedio del experimento bajo el tratamiento ésimo

$y_{...}$ = Sumatoria de los resultados promedio del experimento

n = Numero de interacciones (replicas)

5.3.12.2. Suma de Cuadrados del Error.

Gutiérrez, De la Vara (2012) comentan que esta suma, incluye la sumatoria de los residuos cuadráticos y las variaciones producida por los resultados experimentales de la variable predictora y se calcula mediante la siguiente expresión (p. 126).

$$SS_E = SC_T - SC_A - SC_B - SC_{AB} - SC_C - SC_{AC} - SC_{BC} - SC_{ABC} \quad (33)$$

Seguidamente, efectúa operaciones de cálculo para obtener la de suma de cuadrados de los efectos con mediante Minitab 19. Los resultados se representan en la Tabla 17.

Tabla 17*Suma de cuadrados de los efectos*

Término	Suma de cuadrados
A: TEMP. SECADO	2.3437
B: PESO MUESTRA	7.5937
C: PERICIA	6.5104
A*B: TEMP. SECADO *PESO MUESTRA	0.0938
A*C: TEMP. SECADO *PERICIA	0.2604
B*C: PESO MUESTRA *PERICIA	0.2604
A*B*C: TEMP. SEC.*PESO MUES.*PERICIA	0.0104
ERROR	0.3333
TOTAL	17.4062

5.3.12.3. Cálculo de los Cuadrados Medios.

Los cuadrados medios en el análisis de varianza “miden qué tanta variación explica un término o un modelo, asumiendo que todos los demás términos están en el modelo, independientemente de su orden en el modelo. A diferencia de las sumas de los cuadrados, los cuadrados medios consideran los grados de libertad. El cuadrado medio del error (también llamado CM_E) es la varianza alrededor de los valores ajustados, los cuadrados medios” (Soporte de Minitab 18, 2021) para nuestro modelo tienen las cantidades siguientes:

Cuadrado medio de los efectos principales:

$$CM_A = \frac{SC_A}{(a - 1)} \quad (34)$$

$$CM_A = \frac{2.3437}{1} = 2.3437$$

$$CM_B = \frac{SC_B}{(b-1)} \quad (35)$$

$$CM_B = \frac{7.5937}{1} = 7.5937$$

$$CM_C = \frac{SC_C}{(c-1)} \quad (36)$$

$$CM_C = \frac{6.5104}{1} = 6.5104$$

Cuadrado medio de los efectos de interacción:

$$CM_{AB} = \frac{SC_{AB}}{(a-1) * (b-1)} \quad (37)$$

$$CM_{AB} = \frac{0.0938}{1} = 0.0938$$

$$CM_{AC} = \frac{SC_{AC}}{(a-1) * (c-1)} \quad (38)$$

$$CM_{AC} = \frac{0.2604}{1} = 0.2604$$

$$CM_{BC} = \frac{SC_{BC}}{(b-1) * (c-1)} \quad (39)$$

$$CM_{BC} = \frac{0.2604}{1} = 0.2604$$

$$CM_{ABC} = \frac{SC_{ABC}}{(a-1) * (b-1) * (c-1)} \quad (40)$$

$$CM_{ABC} = \frac{0.0104}{1} = 0.0104$$

Cuadrado medio del error:

$$CM_E = \frac{SC_{ABC}}{a * b * c * (n - 1)} \quad (41)$$

$$CM_E = \frac{0.3333}{16} = 0.02083$$

5.3.13. Cálculo de F de FISHER

Según Fernández (2020) con las estimaciones ya realizadas, se efectuó el análisis de varianza, pero, antes se determina la prueba de distribución estadística F de Fisher, con el cociente de la estimación de los efectos sobre los errores, expresada como la siguiente ecuación:

$$F_0 = \frac{MS_{Efectos}}{MS_{Error}} \quad (42)$$

Según Gutiérrez, De la Vara (2012) el valor estadístico de prueba resultante de la aplicación de la expresión anterior se tiene que comparar con un valor tabular de F (que se encuentran en tablas), que indicará el valor máximo del valor estadístico de prueba que ocurriría si H_0 fuera verdadera, a un nivel de significación seleccionado en 0.05. Para realizar los cálculos se ha tenido en cuenta las características de la distribución F de Fisher, tales como los grados de libertad (p. 105); y las estimaciones de F de Fisher de los factores que se viene analizando para el secado de los concentrados de cobre, se aplican las siguientes expresiones:

F de Fisher de los efectos principales:

$$F_{0(A)} = \frac{CM_A}{CM_E} \quad (43)$$

$$F_{0(A)} \frac{2.3437}{0.02083} = 112.50$$

$$F_{0(B)} = \frac{CM_B}{CM_E} \quad (44)$$

$$F_{0(B)} = \frac{7.5937}{0.02083} = 364.50$$

$$F_{0(C)} = \frac{CM_C}{CM_E} \quad (45)$$

$$F_{0(C)} = \frac{6.5104}{0.02083} = 312.50$$

F de Fisher de los efectos de interacción:

$$F_{0(AB)} = \frac{CM_{AB}}{CM_E} \quad (46)$$

$$F_{0(AB)} = \frac{0.0938}{0.02083} = 4.50$$

$$F_{0(AC)} = \frac{CM_{AC}}{CM_E} \quad (47)$$

$$F_{0(AC)} = \frac{0.26044}{0.02083} = 12.50$$

$$F_{0(BC)} = \frac{CM_{BC}}{CM_E} \quad (48)$$

$$F_{0(BC)} = \frac{0.2604}{0.02083} = 12.50$$

$$F_{0(ABC)} = \frac{CM_{ABC}}{CM_E} \quad (49)$$

$$F_{0(ABC)} = \frac{0.0104}{0.665} = 0.50$$

F de Fisher critico: Ver Figura 44.

Figura 44

Valores de F de Fisher

VALORES F. DE LA DISTRIBUCION F DE FISHER										
1 - α = 0.95 ; α = 0.05										
1 - α = P (F $\leq$ f_{a,n₁,n₂})										
n₂ \ n₁	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	161.446	199.499	215.707	224.583	230.160	233.988	236.767	238.884	240.543	241.882
2	18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.329	19.353	19.371	19.385	19.396
3	10.128	9.552	9.277	9.117	9.013	8.941	8.887	8.845	8.812	8.785
4	7.709	6.944	6.591	6.388	6.256	6.163	6.094	6.041	5.999	5.964
5	6.608	5.786	5.409	5.192	5.050	4.950	4.876	4.818	4.772	4.735
6	5.987	5.143	4.757	4.534	4.387	4.284	4.207	4.147	4.099	4.060
7	5.591	4.737	4.347	4.120	3.972	3.866	3.787	3.726	3.677	3.637
8	5.318	4.459	4.066	3.838	3.688	3.581	3.500	3.438	3.388	3.347
9	5.117	4.256	3.863	3.633	3.482	3.374	3.293	3.230	3.179	3.137
10	4.965	4.103	3.708	3.478	3.326	3.217	3.135	3.072	3.020	2.978
11	4.844	3.982	3.587	3.357	3.204	3.095	3.012	2.948	2.896	2.854
12	4.747	3.885	3.490	3.259	3.106	2.996	2.913	2.849	2.796	2.753
13	4.667	3.806	3.411	3.179	3.025	2.915	2.832	2.767	2.714	2.671
14	4.600	3.739	3.344	3.112	2.958	2.848	2.764	2.699	2.646	2.602
15	4.543	3.682	3.287	3.056	2.901	2.790	2.707	2.641	2.588	2.544
16	4.494	3.634	3.239	3.007	2.852	2.741	2.657	2.591	2.538	2.494
17	4.451	3.592	3.197	2.965	2.810	2.699	2.614	2.548	2.494	2.450
18	4.414	3.555	3.160	2.928	2.773	2.661	2.577	2.510	2.456	2.412
19	4.381	3.522	3.127	2.895	2.740	2.628	2.544	2.477	2.423	2.378
20	4.351	3.493	3.098	2.866	2.711	2.599	2.514	2.447	2.393	2.348

Nota: <http://dcb.fi-c.unam.mx/profesores/irene/Notas/tablas/Fisher.pdf>

Como indica Montgomery (2004) observando la Figura 44 detectamos valores de la distribución de F de Fisher tabuladas y los utilizamos para aplicar al modelo de tiempo de análisis de humedad, determinada para ANOVA para los grados de libertad, previamente consideradas y el valor de $\alpha = 0.05$, , en la Figura 44 se encuentra el valor crítico de F es $F_c = F_{0.05, 1, 16} = 4.494$.

5.3.14. Formulación de ANOVA

Para formular la tabla de ANOVA, se siguió lo manifestado por Zapata (2020) la prueba ANOVA o análisis de varianza es un método estadístico que permite descubrir si los resultados del tiempo de análisis por secado de los concentrados de cobre en la Compañía Minera Antapaccay son significativos, es decir, permiten

resolver si es necesario rechazar la hipótesis nula o aceptar la hipótesis alternativa. El uso apropiado de ANOVA en el análisis de los datos de la experimentación requiere que se cumplan algunos supuestos, como también la distribución normal de la información, la independencia de los casos y la igualdad de varianza (p. 88).

Tabla 18

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
A: TEMP. SECADO	1	2.3437	2.3438	112.50	0.000
B: PESO MUESTRA	1	7.5937	7.5938	364.50	0.000
C: PERICIA	1	6.5104	6.5104	312.50	0.000
A*B: TEMP. SECADO *PESO MUESTRA	1	0.0938	0.0938	4.50	0.050
A*C: TEMP. SECADO *PERICIA	1	0.2604	0.2604	12.50	0.003
B*C: PESO MUESTRA *PERICIA	1	0.2604	0.2604	12.50	0.003
A*B*C: TEMP. SEC.*PESO MUES.*PERICIA	1	0.0104	0.0104	0.50	0.490
ERROR	16	0.3333	0.0208		
TOTAL	23	17.4062	17.0938		

La Tabla 18 muestra el análisis de varianza, calculados con los datos preliminares. En esta tabla nos muestra que la mayor significancia de cada uno de los factores considerado en el análisis factorial. No requiere ajuste, dado que el valor-p, encontrada en la tabla ANOVA es superior al nivel de significancia de 0.05 el modelo es adecuado para las condiciones del experimento de secado de concentrado de cobre.

En la Tabla 18 de la varianza (ANOVA), los valores-p que tienen un valor menor a 0.05 (mayores a: $F_c = F_{0.05, 1, 16} = 4.494$) son las más significativas en el

proceso en este caso para el tiempo de análisis de humedad por secado, constituyéndose en variables significativas A, B, C (ver Tabla 19). Entonces, cuando la variable es significativa se rechaza su hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, el análisis incluye tanto a los efectos de interacción como a los efectos principales.

Tabla 19

Toma de decisión del significado de las variables del proceso

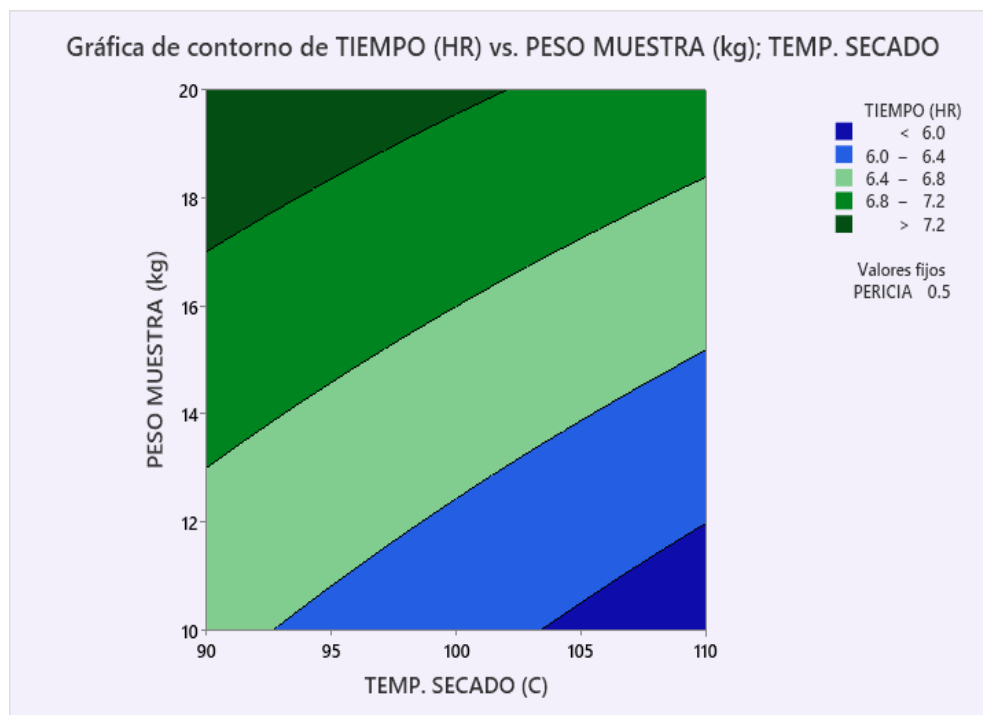
Fuente	Valor F	Valor p	Decisión
A: TEMP. SECADO	112.50	0.000	Significativa
B: PESO MUESTRA	364.50	0.000	Significativa
C: PERICIA	312.50	0.000	Significativa
A*B: TEMP. SECADO *PESO MUESTRA	4.50	0.050	No significativa
A*C: TEMP. SECADO *PERICIA	12.50	0.003	Significativa
B*C: PESO MUESTRA *PERICIA	12.50	0.003	Significativa
A*B*C: TEMP. SEC.*PESO MUES.*PERICIA	0.50	0.490	No significativa

5.3.15. *Graficas de Contorno*

Como menciona Gutiérrez, De la Vara (2012) los gráficos de contornos o curvas de nivel se puede dibujar sin la superficie, como se muestra en las figuras Figura 45 y Figura 46. Esta representación es mejor que la de superficie porque se pueden ver con bastante exactitud las coordenadas del punto con la vibración deseada. Los números que acompañan a las curvas de nivel son precisamente la altura de la superficie sobre toda la isolínea, y éstas se pueden dibujar con los valores que el experimentador quiera (p. 160).

Figura 45

Graficas de contorno de las variables tiempo, peso y temperatura de secado

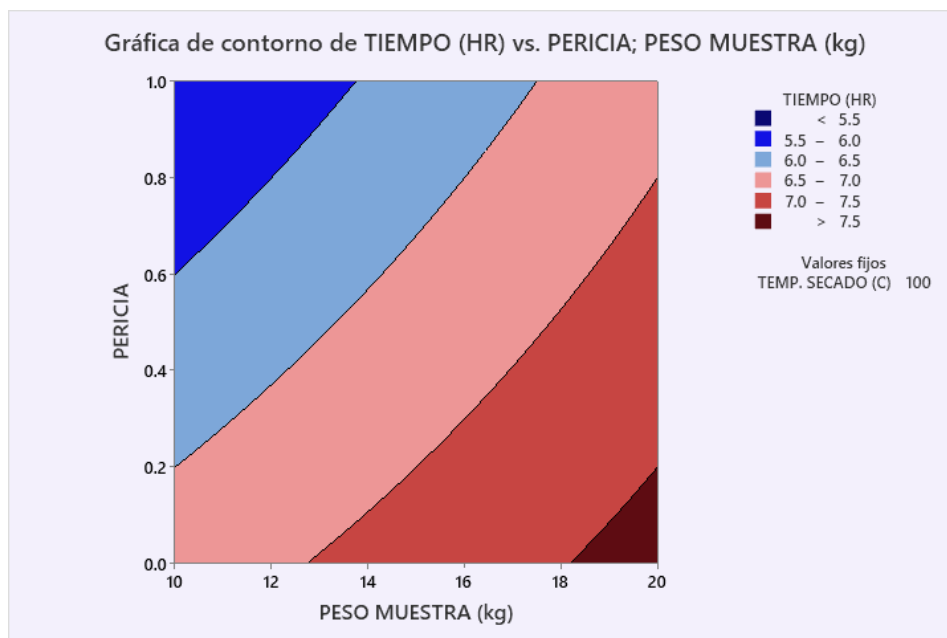


En la Figura 45 observamos que el grafico tiene como coordenadas a las variables A: temperatura de secado y a B: peso de muestra; cuando la otra variable C: pericia de analista no se considera en el análisis de significancia, se puede observar que hay un valor óptimo (mínimo) para la temperatura alta de secado y para el menor peso del concentrado de cobre.

En la Figura 46, observamos la influencia en el tiempo de análisis de humedad por secado de las variables B: peso de la muestra y C: pericia del analista; también se puede apreciar que hay un valor óptimo (mínimo) de la variable dependiente cuando simultáneamente el peso de la muestra de concentrado de cobre es mínimo y la destreza del operador es máxima.

Figura 46

Grafica de contornos de Tiempo, pericia y peso de la muestra



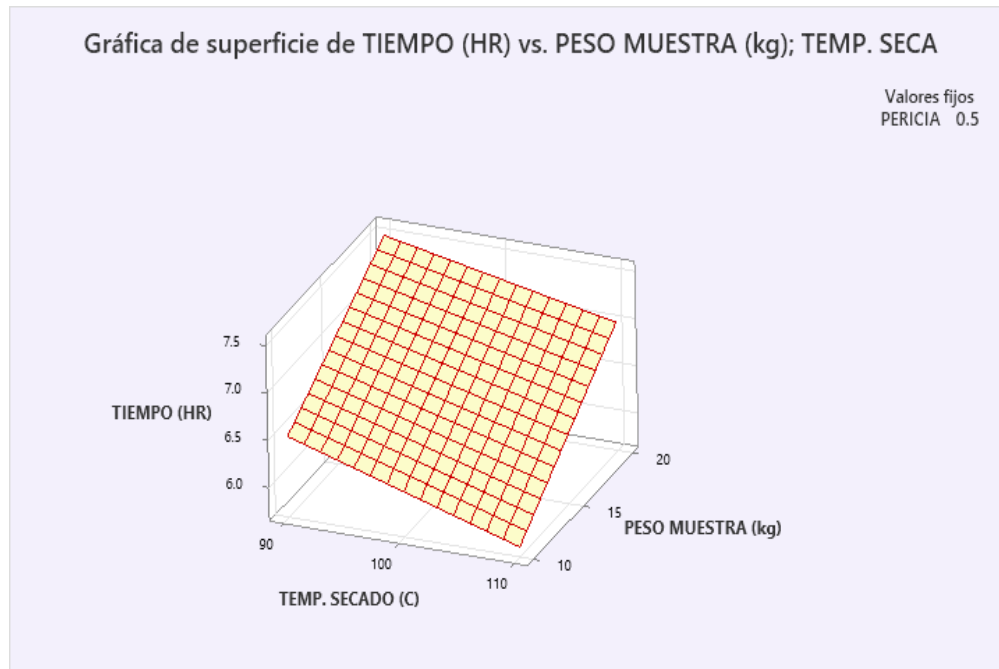
5.3.16. Graficas de Superficie

En la Figura 47 y Figura 48 se observan gráficos de superficie, que como comenta Gutiérrez, De la Vara (2012) resultan de ajustar el modelo de la ecuación de regresión de las variables dependientes respecto a las independientes, a un conjunto de puntos de la región experimental, y por ello describe el comportamiento del tiempo de análisis de humedad por secado sobre la región experimental (p. 135).

“Este gráfico es útil cuando busca combinaciones óptimas entre dos conjuntos de datos. Como en un mapa topográfico, los colores y las tramas indican áreas que están en el mismo rango de valores” (Gutiérrez, De la Vara, 2012, p. 135).

Figura 47

Gráfica de superficie tiempo de secado, peso de muestra y temperatura

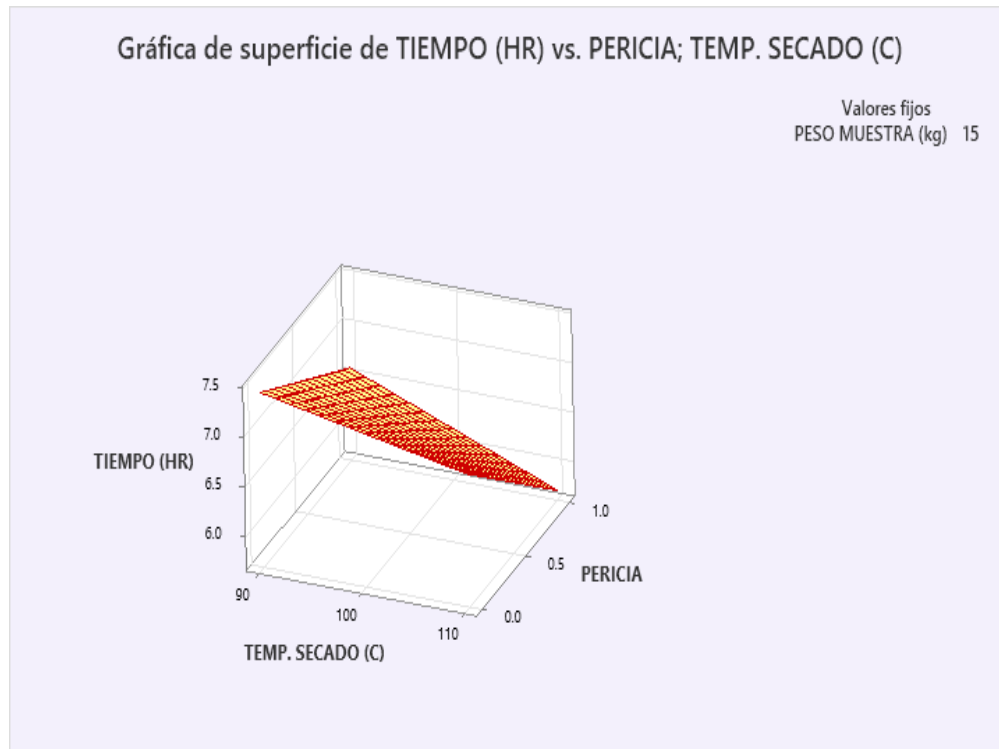


Gutiérrez, De la Vara (2012) afirma que las curvas de nivel o isolíneas, dibujadas como líneas más de color rojo sobre la región experimental, son otra manera de representar la superficie. Cada curva de nivel representa puntos o combinaciones de las variables independientes más significativas en los que los que el tiempo de análisis de la húmedas es la misma (p. 159).

En la Figura 47, se observa el resultado de haber aplicado el método cuando en un problema el producto de interés recibe una influencia de diversas variables, donde el objetivo es mejorar la respuesta y resolver el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos obtenidos.

Figura 48

Gráfica de superficie de tiempo de secado, pericia y temperatura



Vera B., Vera Ch. (2018) afirma que en estos problemas la forma de relación entre la respuesta y las variables independientes como superficie y se observa que la región optima (mínima) se encuentra en la superficie cuando la temperatura de secado es alta y el peso de la muestra es mínima ver Figura 47 . En la Figura 48, la superficie de respuesta al experimento planeado para encontrar la forma como responder los niveles del tiempo de análisis de humedad, cuando son comparados con varios niveles de los otros factores; buscamos optimizar y encontramos que la región mínima de la respuesta al factor estudiado está dada cuando la temperatura de secado es máxima y la pericia del analista es experimentada.

5.3.17. *Análisis de Regresión y Correlación*

En el diseño factorial 2^3 con tres replicas aplicas a la optimización del análisis de humedad por secado de concentrado de cobre, se supone del comportamiento de la respuesta se expresa mediante modelos estadísticos:

$$Y = f(A, B, C) \quad (50)$$

Donde:

A: Temperatura de secado de 90 °C y 110 °C

B: Peso de la muestra de 10 kg y 20kg

C: Pericia del analista es de Principiante (0) y Experimentado (1)

Y: Tiempo de análisis de humedad por secado en horas.

En este modelo, con los datos experimentales de secado en el despacho de concentrado de cobre el objetivo es encontrar la correlación y cuantificar como de relacionadas están las variables involucradas, hallar la regresión lineal consiste en encontrar una ecuación (modelo) que, basándose en la relación existente entre las variables investigadas, permita indicar el valor de una a partir de las otras.

5.3.18. *Modelo Matemático*

Como indica que autor Fernández (2020) teniendo en cuenta que la obtención de los efectos es muy relevante, el siguiente proceder es la obtención de un modelo matemático que simboliza a la operación metalúrgica investigada, con el diseño factorial 2^3 con tres replicas siendo un modelo matemático a escala codificada lineal.

Una vez calculada los contrastes y los efectos de la variable imparcial en la variable principal Y, se observa en la ecuación de regresión lineal las influencias que

resultan significativas. El modelo de regresión para predecir la optimización del secado de concentrados de cobre es:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_A A + \beta_B B + \beta_C C + \beta_{AB} AB + \beta_{AC} AC + \beta_{BC} BC + \beta_{ABC} ABC + \varepsilon \quad (51)$$

Donde:

A: Temperatura de secado de 90 °C y 110 °C

B: Peso de la muestra de 10 kg y 20kg

C: Pericia del analista es de Principiante (0) y Experimentado (1)

$\hat{y}$: Estimado del tiempo de análisis de humedad por secado en horas.

β_0 : Parámetro del modelo (ordenada en el origen).

β_i : Efecto promedio de los i-ésimo factores, manteniéndose constantes el resto de las variables.

ε : Residuo o error

Para estimar los coeficientes $\beta_0, \beta_A; \dots; \beta_P$, se emplean formulas deductivas del análisis de regresión. Luego, el modelo matemático queda determinada y expresada en términos de los coeficientes de error.

5.3.19. Determinación de los Coeficientes de Regresión

Montgomery (2004) afirma que el coeficiente de determinación en la regresión lineal simple es una medida de la bondad de ajuste en una ecuación lineal estimada a partir de los datos reales. La ecuación de regresión contiene a la variable dependiente en función de las variables controladas, se formula linealmente mediante técnicas estadísticas; considerando los dos niveles de cada una de las variables de proceso.

Tabla 20*Coefficientes de regresión codificados*

Termino	Coefficiente	Valor p	Decisión
Constante	6.6875	0.000	Se acepta
A: TEMP. SECADO	-0.3125	0.000	Se acepta
B: PESO MUESTRA	0.5625	0.000	Se acepta
C: PERICIA	-0.5208	0.000	Se acepta
A*B: TEMP. SECADO *PESO MUESTRA	0.0625	0.050	Se acepta
A*C: TEMP. SECADO *PERICIA	-0.1042	0.003	Se acepta
B*C: PESO MUESTRA *PERICIA	0.1042	0.003	Se acepta
A*B*C: TEMP. SEC.*PESO MUES.*PERICIA	0.0208	0.490	Se acepta

Efectuamos el análisis de varianza de nuestro modelo de regresión, cuyos coeficientes codificados se ve en la Tabla 20, se verifica la hipótesis sin mayor complicación para los datos experimentales. La hipótesis por probar es

$H_0: \beta_i = 0$ (el coeficiente no es válido para explicar a Y)

$H_A: \beta_i \neq 0$ (el coeficiente es válido para explicar a Y)

Realizada la inferencia de los coeficientes determinados en la Tabla 20 haciendo uso de la distribución de t de Student con una confianza del 95 %, se acepta a cada uno de los coeficientes por explicar al tiempo de análisis de humedad por secado.

Como resultado, los cálculos para encontrar los coeficientes de regresión se ajustan al método de mínimos cuadrados. En la Tabla 20, se muestra los valores de los tomados por los (β_i) efectos promedios de los i-ésimo factores intervinientes en la

experimentación de secado y todos los coeficientes se aceptan después de la validación del valor-p aplicados al estadístico de prueba t de Student.

5.3.20. *Formulación del modelo de regresión*

Después de la prueba estadística para el caso de la regresión y sustentada de la prueba de hipótesis se obtiene los coeficientes no codificados (escala natural), usando el programa Minitab 19:

$$\beta_0 = 917$$

$$\beta_A = -0.0333$$

$$\beta_B = 0.0083$$

$$\beta_C = 1.67$$

$$\beta_{AB} = 0.000833$$

$$\beta_{AC} = -0.0333$$

$$\beta_{BC} = -0.042$$

$$\beta_{ABC} = 0.00083$$

Finalmente, el modelo de regresión natural el tiempo de análisis de humedad es el siguiente:

$$\begin{aligned} \text{TIEMPO (HR)} = & 9.17 - 0.0333 \text{ TEMP. SECADO (}^\circ\text{C)} + 0.0083 \text{ PESO MUESTRA (kg)} \\ & + 1.67 \text{ PERICIA} + 0.000833 \text{ TEMP. SECADO (}^\circ\text{C)} * \text{PESO MUESTRA (kg)} \\ & - 0.0333 \text{ TEMP. SECADO (}^\circ\text{C)} * \text{PERICIA} \\ & - 0.042 \text{ PESO MUESTRA (kg)} * \text{PERICIA} \\ & + 0.00083 \text{ TEMP. SECADO (C)} * \text{PESO MUESTRA (kg)} * \text{PERICIA} + \varepsilon \end{aligned} \quad (52)$$

5.3.21. *Cálculo del Coeficiente de Determinación “R²”*

Según Gutiérrez, De la Vara (2012) el coeficiente de determinación (R^2) y el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{aj}), que se obtienen a partir del ANOVA, son dos de los estadísticos más útiles para medir la calidad global del modelo. Para calcular la correlación de los factores mediante el coeficiente de regresión obtenido

entre la variación explicada y la variación total (p. 128); se calcula de la siguiente manera:

$$R^2 = \frac{\text{Variacion explicada}}{\text{Variacion total}} \quad (53)$$

Con los datos de la Tabla 18, encontramos:

$$R^2 = \frac{SS_{Total} - SS_E}{SS_{Total}} \quad (54)$$

$$R^2 = \frac{17.4062 - 0.3333}{17.4062} = 0.9808$$

El resultado obtenido es 98.08 % de calidad global del modelo, este ajuste del modelo para secado del concentrado de cobre es muy adecuado, y podemos usarla para predecir resultados de la variable tiempo de análisis de humedad por secado y consolidar la hipótesis de investigación.

Montgomery (2004) comenta que el coeficiente de determinación ajustado es la medida que soluciona los problemas que presenta el coeficiente de determinación. Este coeficiente es exactamente igual que el coeficiente de determinación con una única diferencia: el coeficiente de determinación ajustado penaliza la inclusión de aquellas variables que no resultan trascendentales para la variable real (p.244). El estadístico R^2 ajustada, se calculó con la siguiente ecuación:

$$R_{aj}^2 = \frac{CM_{Total} - CM_E}{CM_{Total}} \quad (55)$$

$$R_{aj}^2 = \frac{17.0938 - 0.0208}{17.0938} = 0.9887$$

Se observa que esta ajustado para las variables temperatura de secado, peso de la muestra y pericia del analista, mostrándonos que estos factores y sus interacciones, en las tres replicas tienen efectos que se ajustan en el orden del 98.87 % sobre el tiempo de análisis de humedad por secado en horas, confirmando buen ajuste de los factores involucrados.

5.3.22. Optimización del Diseño

La aplicación del diseño 2^3 con tres replicas para la realización de pruebas experimentales del secado en el despacho de concentrado de cobre tiene el propósito de optimizar con la minimización de la variable dependiente (Y) en función de las independientes de la operación de secado (A, B y C), bajo las siguientes condiciones:

- Cumplir el modelo es satisfacer al análisis de la varianza (ver Tabla 19) y los factores experimentales satisfacen su significancia.
- Cumplir, es que los coeficientes de regresión codificados (ver Tabla 20) cumplen la validez para explicar la operación de secado de concentrados de cobre.

Como indica los autores Vera B., Vera Ch. (2018) al verificar las dos condiciones anteriores, podemos concluir que los resultados cuentan con adecuada consistencia de la estadística inferencial (p. 99).

Tabla 21

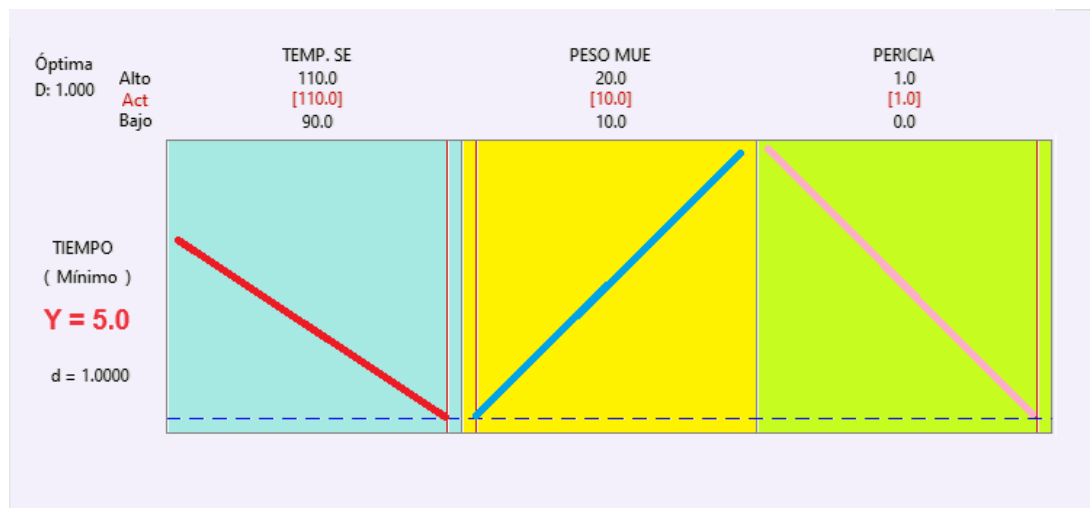
Optimización del tiempo de análisis de secado del concentrado de cobre

Solución	Variables dependientes			Variable independiente	Reducción óptima	
	Temp. secado	Peso muestra	Pericia	Tiempo de análisis	IC de 95%	Replicas
1	110	10	1	5	(4.82; 5.18)	3

En términos generales, optimizar la operación de secado se refiere a la capacidad de minimizar de la manera más eficiente posible el tiempo de análisis de humedad por secado, utilizando cantidad adecuada de recursos.

Figura 49

Determinación de la optimización del tiempo de análisis de humedad



Con la ecuación de regresión lineal podemos, para el proceso de secado de concentrado de cobre, obtener el valor óptimo (mínimo de 5 horas de tiempo de análisis de humedad). En la Figura 49, Gutiérrez, De la Vara, (2012) afirman que finalmente, se muestra el valor óptimo de cada variable con la ayuda de Minitab 19, y de esta forma lograr la planicie de la superficie respuesta del modelo factorial, los resultados cuantitativos se observan en la tabla Tabla 21.

5.3.23. Verificación de la Adecuación del Modelo de Optimización

Gutiérrez, De la Vara (2012) afirman que la validez de los resultados obtenidos en cualquier análisis de varianza queda supeditada a que los supuestos del modelo se cumplan. Estos supuestos son: normalidad, varianza constante (igual varianza de los tratamientos) e independencia (p. 81).

Ya se ha obtenido los resultados de la optimización del análisis de humedad en el despacho del concentrado de cobre, es importante asegurarnos de que estos sean útiles para la toma de decisiones, procurando que los resultados y las conclusiones sean objetivas, para lo cual se hizo uso de Minitab-19; esto es, la respuesta (tiempo de análisis de humedad por secado) como indica Gutiérrez, De la Vara (2012) se debe distribuir de manera normal, con la misma varianza en cada tratamiento y las mediciones deben ser independientes, ver Figura 50.

Según Gutiérrez, De la Vara (2012) para comprobar cada supuesto existen pruebas analíticas y gráficas que veremos a continuación. Muchas veces, las pruebas graficas se prefieren por sencillez. Aunque no son precisas, en la mayoría de los casos proporcionan la evidencia adecuada en contra o a favor de los supuestos. Los residuos, e_{ij} , se definen como la diferencia entre la respuesta observada (Y_{ij}) y la respuesta predicha por el modelo ($\hat{Y}_{ij}$). Lo cual permite hacer un diagnóstico más directo de la calidad del modelo, ya que su magnitud señala qué tan bien describe a los datos el modelo, veamos el análisis en la forma gráfica ver Figura 50.

Los supuestos del modelo, en términos de los residuos, son:

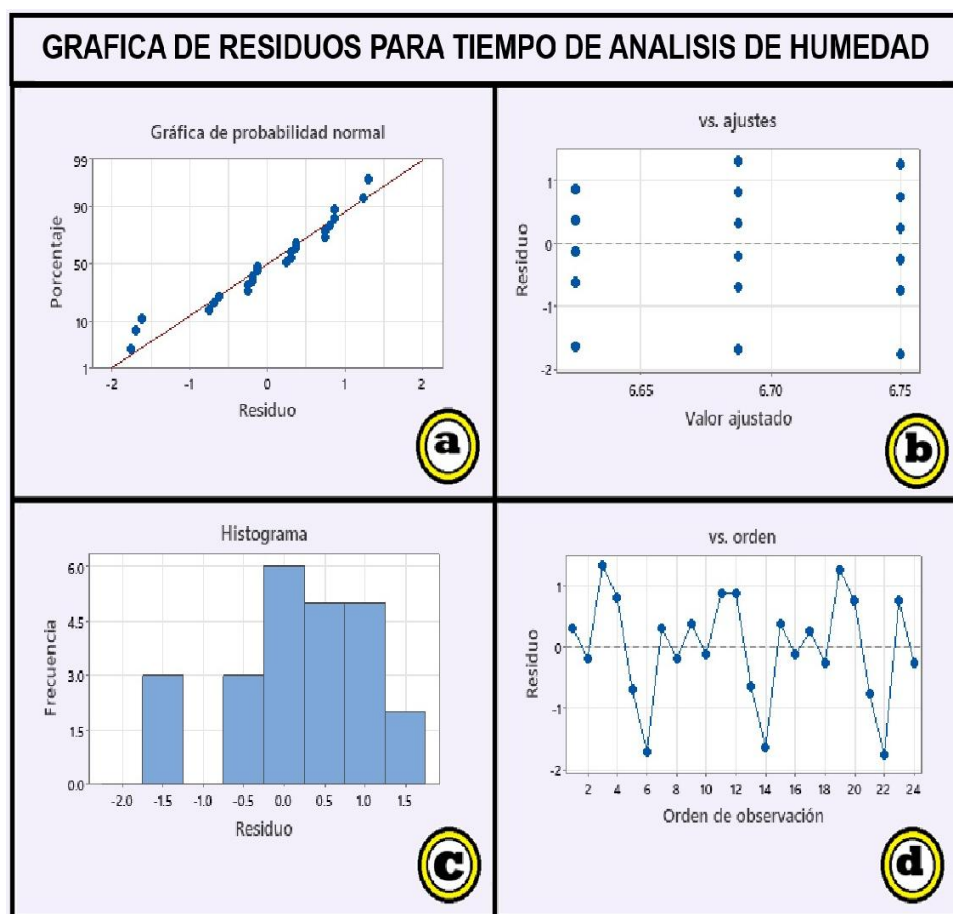
- Como indica Gutiérrez, De la Vara (2012) los residuos siguen una distribución normal con media cero, según la Figura 50A, los puntos graficados se aproximan a una recta, entonces afirmamos que las perturbaciones aleatorias del modelo tienen distribución normal.
- Los residuos de cada tratamiento tienen la misma varianza S^2 según la Figura 50D, se cumple el supuesto de varianza constante, ya que la amplitud de la dispersión de los

puntos en cada nivel de factor tiende a ser similar; y no se cumple el supuesto si hay diferencias fuertes en esta amplitud.

- Los residuos son independientes entre sí, según la Figura 50B, se detecta una tendencia a tener rachas con residuos positivos y negativos, esto nos indica que los datos son independientes, entonces, está asegurado la independencia de las observaciones

Figura 50

Gráficos de residuos para el tiempo de análisis de humedad



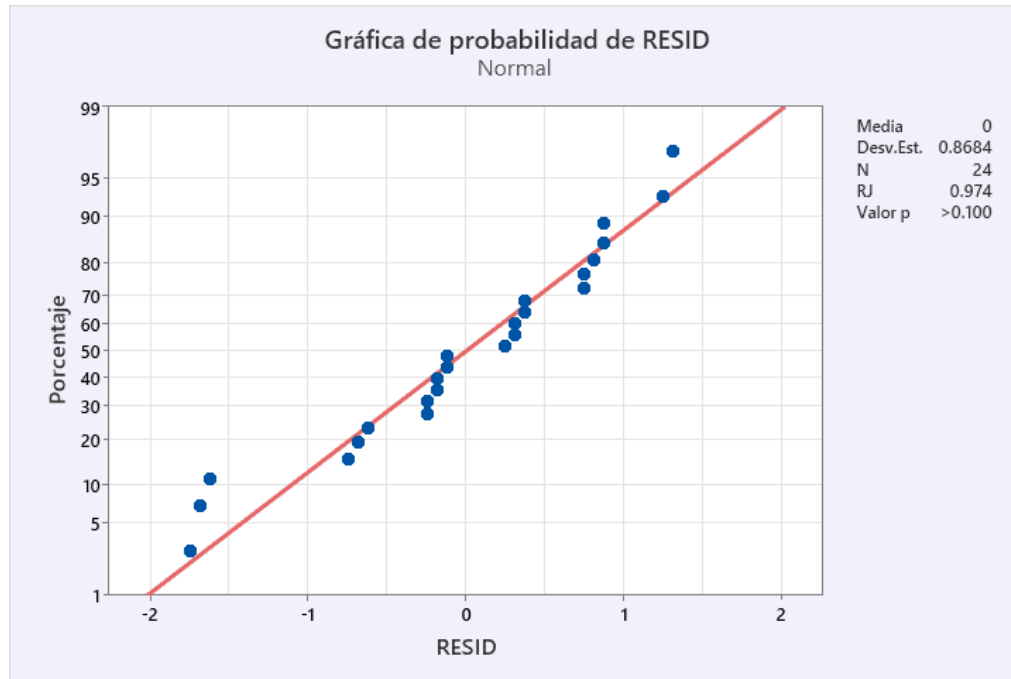
5.3.24. Prueba de Normalidad de Ryan-Joiner

Según Fernández (2020) el estadístico de Ryan-Jonier midiendo la precisión con la que los datos se ajustan a una distribución normal y resolviendo la correlación

entre los datos y las puntuaciones normales. Los datos se encuentran dentro de la gráfica de probabilidad normal cuando el coeficiente de correlación se acerca a 1. Si el valor crítico adecuado es menor, se rechaza la hipótesis de normalidad nula.

Figura 51

Gráficos de probabilidad para la prueba de Ryan-Joiner



Observando la Figura 51, el valor-p es mayor que 0.100, lo que nos indica que los datos del experimento de secado del concentrado de cobre si se distribuye normalmente. Además, el coeficiente de correlación de Ryan-Joiner evalúa la solidez de esta correlación; y se encuentra que el valor es de 0.974 se encuentra cerca de 1, entonces la población es normal.

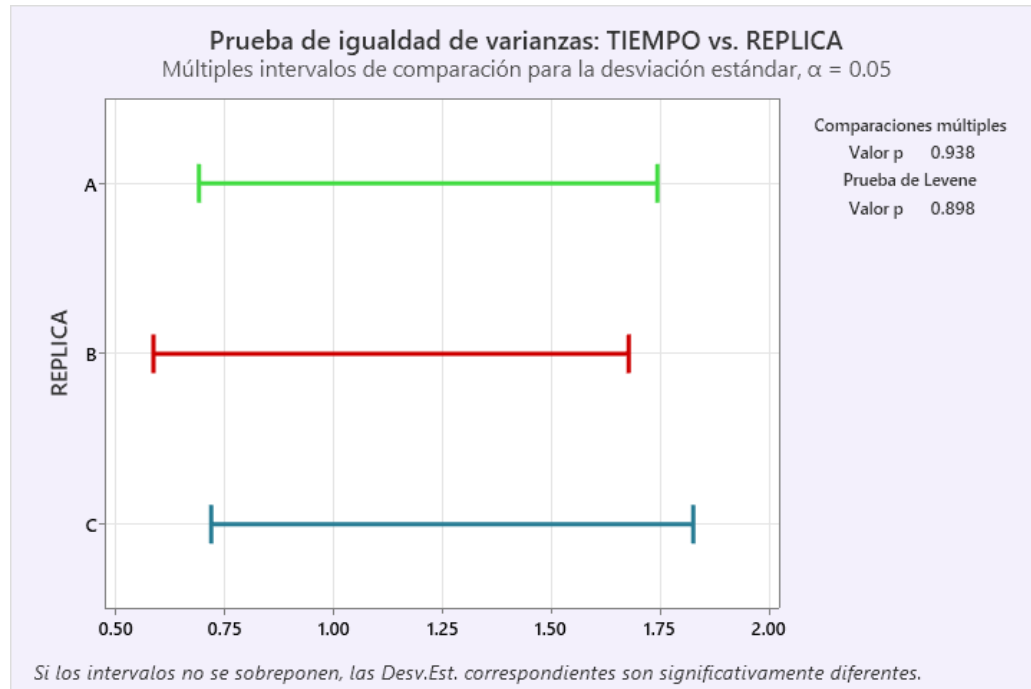
5.3.25. Prueba de Varianza Constante Mediante la prueba de Levene

Si hay dudas sobre la varianza constante, lo mejor es usar la prueba de Levene (creada por el bioquímico y medico Phoebus Aaron Theodore Levene). Vera B., Vera Ch. (2018) afirman que en una prueba estadística inferencial utilizada para evaluar la

igualdad de las varianzas. La prueba de Levene evalúa este supuesto. Se pone a prueba la hipótesis nula de que las varianzas poblacionales son iguales (llamado homogeneidad de varianza u homocedasticidad).

Figura 52

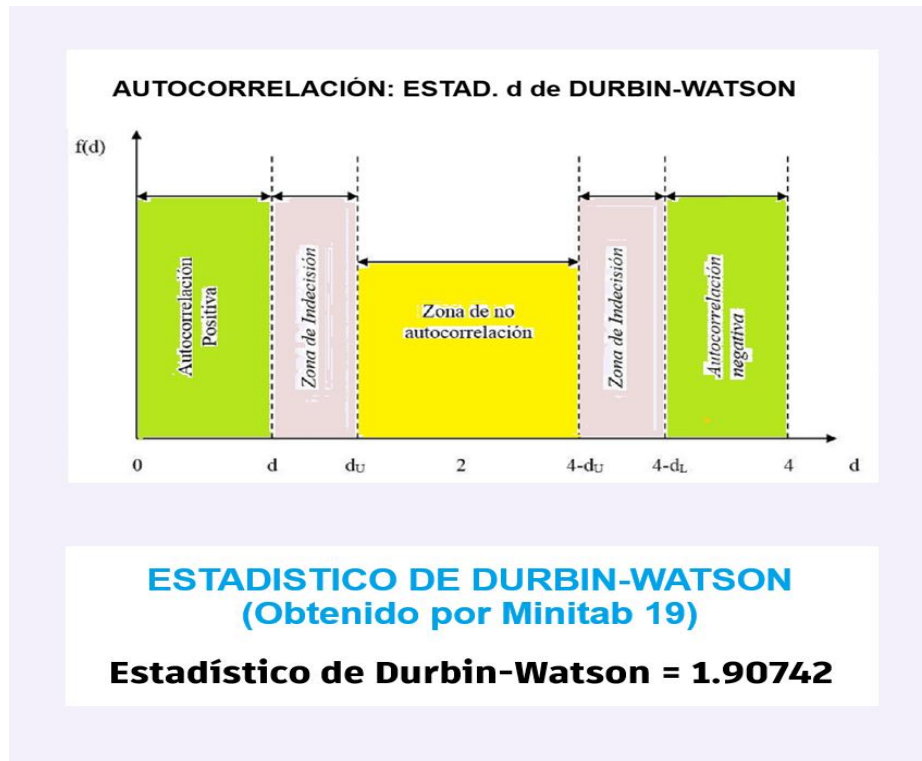
Gráfica de igualdad de varianzas de la variable tiempo con las réplicas



La prueba de Levene es un método ampliamente utilizado para probar la homogeneidad de la varianza. Es una prueba robusta que no supone una distribución normal de los datos. En la Figura 52, el valor p de la Prueba de Levene es igual a 0.898, superior a 0.05, por lo tanto, no hay diferencia entre las varianzas de los tres grupos de réplicas.

5.3.26. Prueba de Independencia de Durbin-Watson

Evaluar la autocorrelación en los modelos de regresión es crucial para garantizar resultados precisos y confiables. Uno de los métodos más utilizados para probar la autocorrelación es la estadística de Durbin-Watson.

Figura 53*Prueba de Independencia de Durbin-Watson*

Esta estadística proporciona una medida del grado de correlación entre los residuos adyacentes en un modelo de regresión de series temporales. Se utiliza para probar la presencia de autocorrelación en los residuos, lo que indicaría que todavía hay patrones en los datos que no se han contabilizado en el modelo. La interpretación de la estadística de Durbin-Watson puede ser un poco complicado, ya que el valor puede variar de 0 a 4, con valores alrededor de 2 que indican que no hay autocorrelación.

Según la Figura 53, utilizada para ayudar a detectar la presencia de autocorrelación en los residuos de un análisis de regresión, se observa que el valor de 1.90752 es muy aproximado a: $d = 2$. Lo que indica que los datos experimentales del secado de concentrados de cobre no tienen autocorrelación, luego, estos datos son independientes.

5.4. Discusión de Resultados

- El autor Ortiz E. (2018) en Huancayo, Perú; realizó el trabajo de investigación denominado CINÉTICA DE SECADO, CARACTERIZACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL TIEMPO ÓPTIMO DE PULVERIZADO PARA UN CONCENTRADO DE PLOMO, COBRE Y ZINC A NIVEL DE LABORATORIO, determinó que el concentrado de Cobre seca a una temperatura de 105 ± 5 °C y a un tiempo óptimo de análisis de humedad por secado de 14h ya que al momento de secar en un mayor tiempo el concentrado de cobre tiende a sufrir el fenómeno de oxidación; en nuestra tesis también se optó por realizar pruebas estadísticas de secado con un rango de temperatura de secado de 90 °C a 110 °C el cual según los resultados obtenidos por diseño factorial se logró la máxima optimización del tiempo de análisis de humedad por secado a una temperatura de 110 °C alineándonos así a la norma NTP ISO 10251:2016; con una reducción del tiempo de análisis de humedad por secado según grafica de efectos de los factores principales de 7h a 6h con una contribución porcentual de 18.5% con un nivel de confianza del 95%.
- El autor Huacca M., (2019) en Arequipa, Perú, en su tesis intitulado MUESTREO DE CONCENTRADO EN EL ÁREA DE DESPACHO DE LA PLANTA CONCENTRADORA DE SULFUROS 1 PARA EL TRANSPORTE BIMODAL, Utilizó como análisis principal de humedad un analizador halógeno de humedad, cuyo peso de muestra de concentrado de cobre a analizar oscila en 30gr y un tiempo de secado de 30min, dando resultados rápidos y eficaces, dicho método rápido no reemplaza a un método acreditado, solo da un resultado aproximado rápido de humedad mas no será utilizado para el posterior análisis químico de la muestra; en

nuestra tesis se desarrolló un análisis de humedad acreditado según norma NTP ISO 17025-2017, utilizando un horno de secado de aire forzado; se consideró a la variable peso de la muestra dentro de un rango de 10 a 20kg de concentrado de cobre, garantizando así un peso de muestra ya homogenizada mayor o igual a 1kg tal como nos indica la norma técnica peruana NTP ISO 12743-2017; se logró una mayor optimización del tiempo de análisis de humedad por secado con un peso de 10kg logrando así reducir el tiempo de análisis de humedad según grafica de efectos de los factores principales de 7.5h a 6h con una contribución porcentual de 33.3% con un nivel de confianza del 95%.

- El autor Hallasi V., (2018) en Arequipa, Perú, en su tesis intitulado SECADO TÉRMICO DE CONCENTRADOS DE COBRE A NIVEL DE LABORATORIO, realizó las pruebas experimentales con un peso de muestra de 5g y un intervalo de tiempo de secado de 3 minutos con una temperatura de secado de 65°C a 100°C, logrando este ultimo la mayor velocidad de secado, esto se debe a que al elevar la temperatura aumenta la transferencia de calor al concentrado y por lo tanto la transferencia de masa, lo que quiere decir que la temperatura del concentrado aumenta, elevando la presión de vapor de agua de la muestra y conseguir un aumento de la velocidad de secado; pero a medida que aumenta el tiempo de secado se observa una disminución de la velocidad de secado esto se debe a la perdida de humedad en el tiempo; en nuestra tesis se realizó la prueba de secado calculando el tiempo de análisis de humedad por secado considerando a la variable temperatura de secado de 90 °C a 110 °C, peso de muestra de 10kg a 20kg el cual nos garantiza un peso mayor o igual a 1kg tal cual nos indica la norma técnica peruana NTP ISO 12743-2017, considerando

estas variables se obtuvo una reducción del tiempo de análisis de humedad por secado según grafica de efectos de los factores principales con 110 °C de 1h con una contribución porcentual de los efectos del 18.5%; y un peso de muestra de 10kg se logró una reducción del tiempo de secado de 1.5h y una contribución porcentual de 33.3% decidiendo así mantener las variables en esos valores para toda la operación de secado.

- Organización Internacional de Normalización (2017) Ginebra, Suiza; en su norma ISO IEC 17025:2017 denominado: REQUISITOS GENERALES PARA LA COMPETENCIA DE LOS LABORATORIOS DE ENSAYO Y CALIBRACIÓN, nos indica los lineamientos para asegurar la confiabilidad en la operación de los laboratorios para que estos proporcionen resultados válidos y confiables, en dicha norma nos indica que todo el personal debe ser constantemente capacitado y evaluado por competencia técnica para asegurar la calidad de los resultados obtenidos y así lograr obtener resultados válidos y confiables; en nuestra tesis se consideró como variable a la pericia del analista y como indicadores al grado de experiencia que va desde Principiante (0) ha Experimentado (1), del cual con un modelo de diseño factorial 2^k se comparó de qué manera influye en la optimización del tiempo de análisis de humedad por secado, dando resultados favorables a nuestra investigación puesto que el analista experimentado con un nivel de confianza del 95% y según la gráfica de los efectos de los factores principales presentó una contribución porcentual del 30.9% y una mejora en el tiempo de análisis de humedad frente al analista principiante de 1h de secado.

CONCLUSIONES

- Se optimizó el tiempo de análisis de humedad por secado de las muestras de concentrado de cobre de Antapaccay utilizando el modelo de diseño experimental 2^3 y expresado en función de las 3 variables: temperatura de secado, peso de la muestra, pericia del analista, explicado al 95 % de nivel de confianza en la respuesta, se encontró que el coeficiente regresión ajustada es de 0.9887, indicando que la variable tiempo de análisis de la humedad está perfectamente explicada por la ecuación de regresión en unidades no codificadas (natural) es:

$$\begin{aligned} \text{TIEMPO DE ANALISIS (Y)} = & 9.17 - 0.0333 \text{ TEMP. SECADO (}^{\circ}\text{C)} + 0.0083 \\ & \text{PESO MUESTRA (kg)} + 1.67 \text{ PERICIA} + 0.000833 \text{ TEMP. SECADO (}^{\circ}\text{C)} * \text{PESO} \\ & \text{MUESTRA (kg)} - 0.0333 \text{ TEMP. SECADO (}^{\circ}\text{C)} * \text{PERICIA} - 0.042 \text{ PESO MUESTRA} \\ & \text{(kg)} * \text{PERICIA} + 0.00083 \text{ TEMP. SECADO (}^{\circ}\text{C)} * \text{PESO MUESTRA (kg)} * \text{PERICIA} + \end{aligned}$$

- ε . En estas condiciones, el tiempo de análisis de humedad alcanzado fue aproximadamente de 5 horas, lo que nos permite aceptar la hipótesis de investigación planteada.
- Se determinó la influencia de la temperatura de secado en el tiempo de análisis de humedad de las muestras de despacho de concentrado de cobre de Antapaccay, después de realizar el respectivo análisis de varianza del diseño factorial, que se empleó, se encontró que a mayor temperatura de secado se logra menor tiempo de análisis de humedad, deduciendo así que la temperatura optima es la de 110 °C; aceptando así la hipótesis de investigación planteada.
 - Se determinó el peso de la muestra adecuado para el tiempo de análisis de humedad de las muestras de despacho de concentrado de cobre de Antapaccay resultando la

variable más significativa con una contribución porcentual de 33.3% de efecto de minimización frente a las demás variables independientes, concluyendo así con un nivel de confianza del 95% que a menor peso de la muestra (10kg) se logra una reducción del tiempo de análisis de humedad por secado; aceptando así la hipótesis de investigación planteada.

- Se estableció la influencia de la pericia del analista en el tiempo de análisis de humedad de las muestras de despacho de concentrado de cobre de Antapaccay, después de realizar el respectivo análisis de varianza del diseño factorial con un nivel de confianza del 95%, se encontró que con una buena pericia del analista (analista experimentado) se logra menor tiempo de análisis de humedad, esto debido a la correcta preparación de la muestra húmeda por parte del analista experimentado frente a un analista principiante; aceptando así la hipótesis de investigación planteada.

RECOMENDACIONES

- La aplicación de diseños experimentales para la optimización de procesos es de gran iniciativa, puesto que permite determinar que variables son de mayor significancia y determinar valores adecuados de las variables en estudio y así obtener un resultado confiable, por lo que se recomienda utilizarlos constantemente en cualquier tipo de investigación, a su vez es necesario hacer un seguimiento a la implementación de las nuevas condiciones planteadas y lograr beneficios en la operación de secado de los concentrados de cobre.
- Se recomienda cumplir con las calibraciones programadas de los hornos de secado, así como los instrumentos de medición de temperatura como es el termopar, para obtener una correcta lectura de temperatura de secado.
- El peso de la muestra como ya se ha demostrado es una variable muy importante, el cual se recomienda tomar en cuenta y reprogramar el Robot muestreador para que el peso adecuado por muestra sea de 10kg.
- En la etapa de capacitación de analistas, hacer constante evaluación por competencia técnica al personal, esto con el propósito de asegurar la calidad y optimización de la operación de secado de los concentrados de cobre.
- Se recomienda trabajar cumpliendo las normas técnicas peruanas de calidad como son la ISO 17025, ISO 10251, ISO 12743, para lograr obtener resultados válidos y confiables puesto que el análisis de humedad de los concentrados de cobre refleja el total de tonelaje que procesa toda la mina y una desviación o sesgo de estos valores presentaría una gran pérdida económica a la hora de comercializar el concentrado de cobre.

BIBLIOGRAFIA

LIBROS

Fernández Bao Sheila (2020). *Diseño de Experimentos: Diseño Factorial*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.

Gutiérrez P Humberto, De la Vara S. Roman. (2012). *Analisis y diseño de experimentos*. (Tercera ed.). México D.F.: McGRAW HILL.

Hernandez, R., Fernandez, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta ed.). Mexico D.F.: McGRAW HILL.

Lambert, A. (2016). *Manual de Muestreo para Exploración, Minería Subterránea y Rajo Abierto* (Segunda ed.). Coquimbo: Sindempart.

McCabe, W., Smith, J., & Harriot, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (7ma ed.). Mexico D.F., Mexico: McGraw Hill.

Perez, C. (2010). *Técnicas de Muestreo Estadístico* (Primera ed.). Madrid: Ibergarceta publicaciones.

Reyes, G., & Guajardo, J. (2023). *El Proceso de Comercialización de Concentrados de Cobre: una mirada a América Latina y el cumplimiento fiscal* (Primera ed.). Washington D.C: Banco Interamericano de Desarrollo.

Vara, A. (2015). *7 Pasos para Elaborar una Tesis* (Primera ed.). Lima: Editorial Macro.

Vera B. Jaime y Vera Ch. Jaime F. (2018). *Resumen de principios de diseños experimentales*. Quito: Universidad Técnica Estatal de Quevedo.

ARTICULOS

- Ceballos, J. M. (2020). Operaciones y Procesos Bloque 02. *Operaciones Unitarias Importantes*. Universidad de Cantabria, Cantabria, España.
- Compañía Minera Antapaccay S.A. (2019). *Descripción General Antapaccay*. Cusco: Antapaccay.
- Control de Calidad Antapaccay. (2021). *Muestreo, Determinación de Humedad y Preparación de Muestras para Análisis Químico en Muestras de Despacho de Concentrado de Cobre*. Cusco: Antapaccay.
- Convenio SOLAS. (2008). *Código Marítimo Internacional de Cargas Sólidas a Granel*. Londres: Convenio SOLAS.
- Fernandez, J. (2019). Maquinas Termicas: *Poder Calorifico*. Buenos Aires: Universidad Tecnologica de los Andes.
- Inga Paucar, A. (2020). *Cybertesis*. Obtenido de https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/15703/Inga_pa.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Instituto Nacional de Calidad INACAL. (2017). *NTP-ISO 12743:2017*. Lima: Dirección de Normalización INACAL.
- Instituto Nacional de la Calidad INACAL. (2016). *NTP-ISO 10251:2016*. Lima: INACAL.
- LATIZA. (2020). *Guía para la Comercialización de Minerales y Metales*. Lima: Asociación Latinoamericana de Zinc.
- Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y Análisis de Experimentos*. Mexico D.F.: Limusa Wiley. Obtenido de https://www.academia.edu/9101936/Dise%C3%B1o_y_an%C3%A1lisis_de_experimentos_Douglas_C_Montgomery

Organización Internacional de Normalización ISO. (2017). *ISO/IEC 17025:2017 Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y Calibración*.

Ginebra: Comisión Electrotécnica Internacional (IEC).

Quinto, A. (2018). *Gravedad Específica de los Minerales*. Huancayo: UNCP.

Rodriguez, G., & Blanco, R. (2001). *Aseguramiento de la calidad analítica y norma ISO 17025 en laboratorios clínicos y químicos*.

Rojas, V. (2021). *Determinación de la Gravedad Específica*. Lima: UNMSM.

Salazar, J. (2022). *Muestreo, Preparación de la Muestra y Determinación de Humedad en Concentrados de Cu, Pb, Zn, Mo, Au, Ag, Fe*. Trujillo: AMV Consultores.

Zapate Alzate, L. (2020). *Course Hero*. Obtenido de <https://www.coursehero.com/file/69021335/Trabajo-de-dise%C3%B1o-experimentaldocx/>

TESIS

Duran, M. (2019). *Simulación de Proceso de Secado de Concentrado de Cobre*. Tesis de postgrado, Valparaíso.

Escobar, M., & Galindo, S. (2021). *Factores Críticos Operativos que Afectan a la Capacidad de Producción de la Planta Toma la Mano en Huaraz*. Tesis de postgrado, Lima.

Hallasi, V. (2018). *Secado Térmico de Concentrados de Cobre a Nivel de Laboratorio*. Tesis de postgrado, Arequipa.

Huacca, M. (2019). *Muestreo de Concentrado en el Área de Despacho de la Planta Concentradora de Sulfuros 1 para el Transporte Bimodal*. Tesis de postgrado, Arequipa.

Ortiz, E. (2018). *Cinética de Secado, Caracterización y Determinación del Tiempo Optimo de Pulverizado para un Concentrado de Plomo, Cobre y Zinc a nivel de Laboratorio*.
Tesis de postgrado, Huancayo.

PAGINAS WEB

- CROMTEK. (15 de 12 de 2020). *Hornos de Secado*. Recuperado el 07 de 06 de 2023, de Hornos de Secado: tipos y usos en el Laboratorio:
<https://www.cromtek.cl/2022/09/22/horno-de-secado-tipos-y-usos-en-el-laboratorio/>
- Khan Academy. (18 de 03 de 2018). *Poder calorífico del agua*. Recuperado el 06 de 07 de 2023, de Estructura del agua y enlaces de hidrogeno:
<https://es.khanacademy.org/science/ap-biology/chemistry-of-life/structure-of-water-and-hydrogen-bonding/a/specific-heat-heat-of-vaporization-and-freezing-of-water>
- MINITAB, S. d. (10 de 06 de 2020). *support minitab*. Recuperado el 25 de 06 de 2024 de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/20/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/factorial/analyze-variability/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/analysis-of-variance-table/#:~:text=en%20el%20modelo.-,En%20la%20tabla%20An%C3%A1lisis>
- Power Tronic. (16 de 08 de 2021). *Tipos de hornos de secado*. Recuperado el 09 de 06 de 2023, de Tipos y aplicaciones de hornos de secado industriales:
<https://powdertronic.com/cuales-son-los-tipos-y-aplicaciones-de-los-hornos-de-secado-industriales/>
- Rice University. (12 de 09 de 2020). *Diagrama de fases del agua*. Recuperado el 05 de 07 de 2023, de OpenStax, diagrama de fases del agua:
<https://openstax.org/books/qu%C3%ADmica-2ed/pages/10-4-diagramas-de-fase>

Anexo 1) Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES	METODOLOGÍA
¿Cómo optimizar el tiempo de análisis de humedad por secado del despacho de concentrado de cobre de Antapaccay evaluando las variables que intervienen en la operación? ESPECÍFICOS ¿Cómo determinar el tiempo de análisis de humedad por secado adecuado para las muestras del despacho de concentrado de cobre de Antapaccay, modificando dentro de los límites permisibles la temperatura de secado? ¿Cómo influirá la variación del peso de la muestra en el tiempo de análisis de humedad de las muestras de despacho de concentrado de cobre de Antapaccay? ¿Cómo se verá influenciado el tiempo de análisis de humedad por secado de las muestras del despacho de concentrado de cobre de Antapaccay, tomando en cuenta la pericia del analista?	Optimizar el tiempo de análisis de humedad por secado de las muestras de despacho de concentrado de cobre de Antapaccay. ESPECÍFICOS Determinar la influencia de la temperatura de secado en el tiempo de análisis de humedad de las muestras de despacho de concentrado de cobre de Antapaccay. Determinar el peso de la muestra adecuado para el tiempo de análisis de humedad de las muestras de despacho de concentrado de cobre de Antapaccay. Establecer la influencia de la pericia del analista en el tiempo de análisis de humedad por secado de las muestras de despacho de concentrado de cobre de Antapaccay.	La optimización del tiempo de análisis de humedad por secado de las muestras del despacho de concentrado de cobre de Antapaccay es influenciada por la variación de la temperatura de secado, peso de la muestra y pericia del analista. ESPECÍFICOS La temperatura de secado tiene un efecto significativo en el tiempo de análisis de humedad por secado, a mayor temperatura de secado se logra menor tiempo de análisis. El peso de la muestra influye de manera significativa en el tiempo de análisis de humedad por secado, a menor peso de la muestra se logra menor tiempo de análisis. La pericia del analista influye de manera significativa en el tiempo de análisis de humedad por secado, a mayor pericia del analista se logra menor tiempo de análisis.	VARIABLE DEPENDIENTE • Tiempo de análisis de humedad por secado. VARIABLES INDEPENDIENTES • Temperatura de secado • Peso de la muestra • Pericia del analista INDICADOR DEPENDIENTE • Tiempo dedicado al secado (h). INDICADORES INDEPENDIENTES • Cambio de aspecto del concentrado (°C). • Cantidad de concentrado en la muestra (kg) • Grado de experiencia: Principiante (P) Experimentado (E)	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN La investigación es de carácter experimental. METODO DE INVESTIGACIÓN Se aplicará el método científico. TIPO DE INVESTIGACIÓN La presente investigación es aplicada. ALCANCE DE INVESTIGACIÓN La presente investigación tiene un alcance correlacional - explicativo. PLAN DE ANÁLISIS DE DATOS La investigación se analizará con el método experimental factorial 2³, usando el estadístico F de Fisher y el P valor.

Anexo 2) Check list muestreador automático de despacho de concentrados (Robot)

CODIGO: rg_IT_0040_01		CHECK LIST - MUESTREADOR AUTOMATICO DE DESPACHO DE CONCENTRADOS			
ANTES DE INICIAR EL PROCESO DE MUESTREO					
FECHA:		HORA:			
IT	DESCRIPCIÓN	¿OK?	OBSERVACIONES		
1	Inspección y revisión en Terreno				
1.1	Tablero de fuerza				
	Verificar que los interruptores estén arriba				
1.2	Tablero de control				
	Verificar que los interruptores estén arriba				
	Tablero de control Robots (KRC)				
	Verificar que este se encuentre encendido				
	Verificar que LEDs de falla en panel CSP estén apagados				
1.3	Seguridad, instrumentación, accionamientos y control				
	Revisar físicamente barreras, sin golpes o deformaciones que afecten la operación				
	Revisar emisor y receptor en cortinas perimetrales				
	Limpieza de espejos				
	Estado de sensores en barreras de la línea				
	Cerrar puertas de accesos L1 zona de consola				
	Cerrar puertas de accesos L1 zona porta herramienta				
1.4	Sistema neumático				
	Inspección visual del estado del compresor y los circuitos neumáticos (sin mangueras sueltas o fugas de aire)				
1.5	Receptor de concentrado				
	Limpieza de tolva de recepción y ducto a ensacadora				
1.6	Sistema de ensacado				
	Verificar la cantidad de film existente en el rollo				
	Lubricar rodillos con líquido refrecante de adherencia				
	Junta rodillos al tubo formador				
	Hacer una bolsa de prueba desde equipo				
	Alinear Film (en caso sea necesario)				
	Pasar equipo a automático (Botón Fill Bags en verde)				
	Alinear parte inferior de faja transportadora con caída de bolsa				
1.7	Etiquetadora				
	Verificar el estado de la cinta				
	Hacer una etiqueta de prueba desde equipo				
	Verificar que equipo este "EN FUNCIONAMIENTO"				
1.8	Sistema limpieza de herramientas				
	Verificar que no existan componentes sueltos (cabeza de martillo y/o base)				
1.9	Manipulador robótico de muestreo.				
	Inspección visual (no existan golpes ni piezas fuera de lugar)				
	Retirar PE				
	Verificar modo AUTOEXT				
	Verificar velocidad en automático en 100%				
	Arranque sin fallas				
1.10	Herramienta de muestreo (Crítico)				
	Inspección visual (no existan golpes ni piezas fuera de lugar, limpieza)				
2	Consola de operación				
	Realizar Log-in (inicio session)				
	Reconocer alarmas y reestablecer operatividad desde HMI				
	Verificar en pantalla principal el estado general de cada equipo				
	Chequear y habilitar los equipos que aparecen no habilitados				
	Probar manualmente cada herramienta de muestreo verificando su estado (tomar y girar cada herramienta)				
	Accionamiento en manual de cada comando (hacer bolsa, etiqueta, mover barreras, etc)				
EJECUTANTES		Nombres		Firmas	

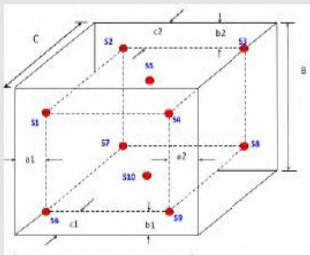
CODIGO: rg_IT_0040_01		CHECK LIST - MUESTREADOR AUTOMATICO DE DESPACHO DE CONCENTRADOS		
DESPUES DE CULMINAR CON EL PROCESO DE MUESTREO				
FECHA:		HORA:		
IT	DESCRIPCIÓN	¿OK?	OBSERVACIONES	
1	Inspección y revisión en Terreno			
1.1	Tablero de control Robots (KRC)			
	Verificar que este se encuentre apagado			
1.2	Seguridad, instrumentación, accionamientos y control			
	Revisar físicamente barreras, sin golpes o deformaciones que afecten la operación en el turno siguiente			
	Revisar físicamente si existen espejos rotos.			
1.3	Sistema neumático			
	Inspección visual del estado del compresor y los circuitos neumáticos (sin mangueras sueltas o fugas de aire)			
1.4	Receptor de concentrado			
	Limpieza de tolva de recepción y ducto a ensacadora			
1.5	Sistema de ensacado			
	Verificar la cantidad de film existente en el rollo			
	Verificar que el equipo que de apagado			
1.6	Etiquetadora			
	Verificar el estado de la cinta			
	Verificar que el equipo que de apagado.			
1.7	Sistema limpieza de herramientas			
	Verificar que no existan componentes sueltos (cabeza de martillo y/o base)			
1.8	Manipulador robótico de muestreo.			
	Inspección visual (no existan golpes ni piezas fuera de lugar, cables y sensores)			
1.9	Herramienta de muestreo (crítico)			
	Realizar limpieza de la sonda y capacho despues de cada turno, o camion con concentrado complejo			
2	Consola de operación			
	Salir de la session (log -out) y Bloquear.			
EJECUTANTES	Nombres	Firmas		

Versión del formato: 00

Fecha de aprobación del formato: 01/02/2020

Formato aprobado por: Supervisor Control de Calidad

Anexo 3) Formato de verificación de temperatura de hornos de secado

CODIGO: rg_IT_0004_02	VERIFICACION DE TEMPERATURA DE HORNO DE SECADO	
Area: Despachos Día: Mes: Dic Año: 2021 Responsable: Horno: LBQ-HOR-009 LBQ-HOR-010 Termopar: LBQ-TPAr-002 Nº certificado: TE-796-2020 Corrección: -0.06 Tº termopar: Tº corregida Horno: Observaciones:	 LBQ-HOR-009 LBQ-HOR-010 Medir: en la parte superior (2da línea) en la parte inferior Rango aceptado: $105 \pm 5 ^\circ\text{C}$ $105 \pm 5 ^\circ\text{C}$ Max: 110 $^\circ\text{C}$ 110 $^\circ\text{C}$ Min: 100 $^\circ\text{C}$ 100 $^\circ\text{C}$	
Registrar		

Anexo 4) Presión de vapor de agua líquida entre 0 °C y 373 °C

$T/^{\circ}\text{C}$	P/mmHg	P/hPa	$T/^{\circ}\text{C}$	P/mmHg	P/hPa	$T/^{\circ}\text{C}$	P/mmHg	P/hPa
0	4.5840	6.1115	47	79.709	106.27	95	634.61	846.08
0.01	4.58780	6.11657	48	83.834	111.77	96	658.34	877.71
1	4.9286	6.5709	49	88.147	117.52	97	682.78	910.30
2	5.2954	7.0599	50	92.648	123.52	98	707.98	943.90
3	5.6861	7.5808	51	97.343	129.78	99	733.95	978.52
4	6.1021	8.1355	52	102.24	136.31	100	760.00	1013.3
5	6.5449	8.7258	53	107.35	143.12	101	787.57	1050.0
6	7.0158	9.3536	54	112.67	150.22	102	815.86	1087.7
7	7.5164	10.021	55	118.23	157.62	103	845.12	1126.7
8	8.0482	10.730	56	124.01	165.33	104	875.06	1166.7
9	8.6130	11.483	57	130.03	173.36	105	906.07	1208.0
10	9.2123	12.282	58	136.29	181.71	106	937.92	1250.5
11	9.8483	13.130	59	142.82	190.41	107	970.60	1294.0
12	10.522	14.028	60	149.61	199.46	108	1004.42	1339.12
13	11.237	14.981	61	156.67	208.88	109	1038.92	1385.11
14	11.993	15.990	62	164.02	218.67	110	1074.56	1432.63
15	12.795	17.058	63	171.65	228.85	111	1111.20	1481.48
16	13.642	18.188	64	179.59	239.43	112	1148.74	1531.53
17	14.539	19.384	65	187.83	250.42	113	1187.42	1583.10
18	15.487	20.647	66	196.39	261.83	114	1227.25	1636.20
19	16.489	21.983	67	205.28	273.68	115	1267.98	1690.50
20	17.546	23.393	68	214.51	285.99	120	1489.14	1985.36
21	18.663	24.882	69	224.09	298.76	125	1740.93	2321.05
22	19.841	26.453	70	234.03	312.01	130	2026.10	2701.24
23	21.085	28.111	71	244.33	325.75	135	2347.26	3129.42
24	22.395	29.858	72	255.02	340.00	140	2710.92	3614.26
25	23.776	31.699	73	266.11	354.78	145	3116.76	4155.34
26	25.231	33.639	74	277.59	370.09	150	3570.48	4760.25
27	26.763	35.681	75	289.49	385.95	175	6694.08	8924.71
28	28.376	37.831	76	301.82	402.39	200	11 659.16	15 544.27
29	30.071	40.092	77	314.58	419.41	225	19 123.12	25 495.40
30	31.855	42.470	78	327.80	437.03	250	29 817.84	39 753.85
31	33.730	44.969	79	341.48	455.27	275	44 580.84	59 436.23
32	35.700	47.596	80	355.63	474.14	300	64 432.8	85 903.3
33	37.769	50.354	81	370.28	493.67	325	90 447.6	120 587
34	39.942	53.251	82	385.43	513.87	350	124 001.6	165 321.9
35	42.221	56.290	83	401.10	534.76	360	139 893.2	186 508.9
36	44.613	59.479	84	417.30	556.35	365	148 519.2	198 009.3
37	47.121	62.823	85	434.04	578.67	366	150 320.4	200 410.7
38	49.750	66.328	86	451.33	601.73	367	152 129.2	202 822.3
39	52.506	70.002	87	469.21	625.56	368	153 960.8	205 264.2
40	55.391	73.849	88	487.67	650.17	369	155 815.2	207 736.5
41	58.413	77.878	89	506.73	675.58	370	157 692.4	210 239.2
42	61.577	82.096	90	526.41	701.82	371	159 584.8	212 762.2
43	64.886	86.508	91	546.72	728.90	372	161 507.6	215 325.8
44	68.349	91.124	92	567.68	756.84	373	163 468.4	217 939.9
45	71.968	95.950	93	589.31	785.68	373.946	165 452.0	220 584.5
46	75.749	100.99	94	611.61	815.41			

Anexo 5) Formato de verificación de balanza analítica

CODIGO: rg_IT_0021_01		VERIFICACION DE BALANZAS																														
Frecuencia de Verificación: Por Turno		Ubicación: Sala de Despacho							Nro de Serie Pesa Patrón 0.5 kg: 1000144337							Nota: La verificación es con Check																
Mes: Enero									Nro de Serie Pesa Patrón 1.0 kg: 1000144339																							
Año: 2022									Nro de Serie Pesa Patrón 2.0 kg: 1000144341																							
Balanza	Día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
	Turno	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A
LEQ. BAL - 027	Responsable																															
	LCS	500.03																														
		500.02																														
		500.01																														
		500.00																														
		499.99																														
	LCI	499.98																														
		499.97																														
	LCS	1000.03																														
		1000.02																														
		1000.01																														
		1000.00																														
		999.99																														
	LCI	999.98																														
		999.97																														
	LCS	2000.03																														
		2000.02																														
		2000.01																														
		2000.00																														
	1999.99																															
LCI	1999.98																															
	1999.97																															
Observaciones:																																
Fecha de Revisión: Revisado Por:																																

Anexo 6) Registros fotográficos

Laboratorio de preparación de muestras de concentrado



Area de muestreo con brazo robotico



Patio de nivelacion de camiones



Brazo robótico muestreando camión encapsulado y convencional



Realizacion de calculos en computadora de trabajo



Zona de pulverizado y zona de prepracion de muestras humedas



Horno de secado de muestras

