



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE UN PLAN DE MUESTREO DE CARBÓN MINERAL TOMANDO
COMO REFERENCIA EL PATRÓN ESTABLECIDO POR LA NORMA ASTM
D 4749-07. CONFIRMACIÓN ESTADÍSTICA A TRAVÉS DE LA PRUEBA DE
BONDAD DE AJUSTE χ^2 CUADRADA**

Ynse Joseph Holwerda Girón

Asesorado por la Inga. Telma Maricela Cano Morales

Asesorado por el Ing. Mario José Mérida Meré

Guatemala, agosto de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN PLAN DE MUESTREO DE CARBÓN MINERAL TOMANDO
COMO REFERENCIA EL PATRÓN ESTABLECIDO POR LA NORMA ASTM
D 4749-07. CONFIRMACIÓN ESTADÍSTICA A TRAVÉS DE LA PRUEBA DE
BONDAD DE AJUSTE χ^2 CUADRADA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

YNSE JOSEPH HOLWERDA GIRÓN

ASESORADO POR LA INGA. TELMA MARICELA CANO MORALES

ASESORADO POR EL ING. MARIO JOSÉ MÉRIDA MERÉ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, AGOSTO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. Renato Giovanni Ponciano Sandoval
EXAMINADORA	Inga. Casta Petrona Zeceña Zeceña
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE UN PLAN DE MUESTREO DE CARBÓN MINERAL TOMANDO
COMO REFERENCIA EL PATRÓN ESTABLECIDO POR LA NORMA ASTM
D 4749-07. CONFIRMACIÓN ESTADÍSTICA A TRAVÉS DE LA PRUEBA DE
BONDAD DE AJUSTE JI CUADRADA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha noviembre de 2012.



Ynse Joseph Holwerda Girón



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Guatemala, 02 de Agosto de 2013

Ingeniero
Victor Manuel Monzón Valdez
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente.

Ingeniero Monzón:

Por medio de la presente HACEMOS CONSTAR que hemos revisado y dado nuestra aprobación al Informe Final del trabajo de graduación titulado **“DISEÑO DE UN PLAN DE MUESTREO DE CARBÓN MINERAL TOMANDO COMO REFERENCIA EL PATRÓN ESTABLECIDO POR LA NORMA ASTM D 4749-07. CONFIRMACIÓN ESTADÍSTICA A TRAVÉS DE LA PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE χ^2 CUADRADA”**, del estudiante de Ingeniería Química Ynse Joseph Holwerda Girón quien se identifica con el carné número 2007-15235.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Alientamente,

Ing. Qco. Mario José Mérida Meré
Coordinador
Laboratorio de Investigación
de Extractos Vegetales –LIEXVE-
Asesor



Inga. Qca. Telma Marcela Cano Morales
Directora
Centro de Investigaciones de Ingeniería / CII
Asesora





Guatemala, 05 de noviembre de 2013
Ref. EI.Q.TG-IF.072.2013

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-058-2012-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Ynse Joseph Holwerda Girón.**

Identificado con número de carné: **2007-15235.**

Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO.**

Seguendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

DISEÑO DE UN PLAN DE MUESTREO DE CARBÓN MINERAL TOMANDO COMO REFERENCIA EL PATRÓN ESTABLECIDO POR LA NORMA ASTM D 4749-07. CONFIRMACIÓN ESTADÍSTICA A TRAVÉS DE LA PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE JI CUADRADA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por los Ingenieros Químicos: **Telma Maricela Cano Morales y Mario José Mérida Meré.**

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Estuardo Monroy Benítez
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación

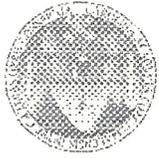


C.c.: archivo



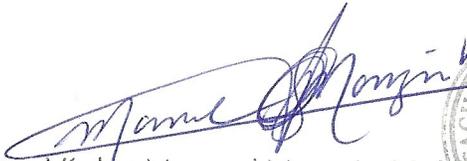
ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de Programas de Arquitectura y de Ingeniería



Ref.EIQ.TG.137.2014

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **YNSE JOSEPH HOLWERDA GIRÓN** titulado: "**DISEÑO DE UN PLAN DE MUESTREO DE CARBÓN MINERAL TOMANDO COMO REFERENCIA EL PATRÓN ESTABLECIDO POR LA NORMA ASTM D 4749-07. CONFIRMACIÓN ESTADÍSTICA A TRAVÉS DE LA PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE χ^2 CUADRADA**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.


Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



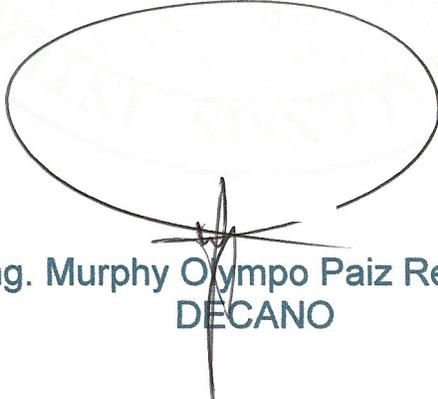
Guatemala, julio 2014

Cc: Archivo
VMMV/ale



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE UN PLAN DE MUESTREO DE CARBÓN MINERAL TOMANDO COMO REFERENCIA EL PATRÓN ESTABLECIDO POR LA NORMA ASTM D 4749-07, CONFIRMACIÓN ESTADÍSTICA A TRAVÉS DE LA PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE χ^2 CUADRADA**, presentado por el estudiante universitario: **Ynse Joseph Holwerda Girón** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO



Guatemala, agosto de 2014

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme el milagro de la vida y permitirme alcanzar mis sueños.
- Mi padre** Jippe Holwerda, me hubiera gustado mucho compartir este sueño junto a tí y realizarme profesionalmente como ingeniero a la par tuya siguiendo tus consejos.
- Mi madre** Lesbia Girón, por tu ejemplo de perseverancia y fortaleza, enfrentando con firmeza las adversidades que la vida te ha puesto en el camino, gracias por indicarme el camino correcto.
- Mis hermanos** Dominique, Patrick, Holwerda Girón y Melissa Herrera Girón, por estar en cada momento a mi lado siempre animándome a seguir adelante y a ti Melissa por demostrarme que hasta la adversidad más grande con fe y fortaleza se puede superar.
- Mis abuelos** Ana María García y Juan Fausto Girón, por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida y haberme guiado a realizar mis estudios en tan majestuosa universidad.
- Mario Herrera** Por haberme criado como su hijo.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala Por la oportunidad de realizar mi formación académica en tus aulas y de ese modo ser un orgulloso egresado de la máxima casa de estudios.

**Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería
Química** Por el conocimiento teórico brindado en mi formación académica.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XI
GLOSARIO.....	XIII
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
HIPÓTESIS.....	XVIII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1 Origen del carbón mineral.....	3
2.1.1. Clasificación del carbón.....	3
2.1.2. Clasificación según su uso.....	6
2.1.3. Composición del carbón.....	6
2.1.3.1. Humedad.....	7
2.1.3.2. Materia volátil.....	7
2.1.3.3. Carbón fijo.....	7
2.1.3.4. Cenizas.....	7
2.1.3.5. Azufre.....	8
2.1.3.6. Poder calorífico.....	9
2.2. Muestreo de carbón.....	9
2.2.1. Factores a tener en cuenta al realizar el muestreo.....	10

2.2.1.1.	Instrumento de muestreo.....	10
2.2.1.2.	Segregación.....	13
2.2.1.3.	Masa del incremento.....	14
2.2.1.4.	Número de incrementos.....	14
2.2.2.	Métodos de muestreo.....	16
2.2.3.	Clasificación de los muestreos en orden de preferencia.....	17
2.2.3.1.	Condiciones particulares para los incrementos.....	18
2.2.3.2.	Muestreo en banda parada.....	19
2.2.3.3.	Muestreo haciendo un corte total de un chorro de material en caída.....	21
2.2.3.4.	Muestreo haciendo un corte parcial de un chorro de material en caída.....	22
2.2.3.5.	Muestreo estacionario.....	23
2.2.3.5.1.	Muestreo en pila.....	23
2.2.3.5.2.	Muestreo en pala de cargador frontal.....	25
2.2.3.5.3.	Muestreo de camiones o tracto mulas.....	26
2.3.	Preparación de muestras.....	27
2.3.1.	Preparación de muestras para análisis granulométrico.....	32
2.4.	Análisis de muestras.....	33
2.4.1.	Análisis próximo.....	33
2.4.2.	Análisis final.....	34
2.5.	Granulometría.....	35

3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	37
3.1.	Variables.....	37
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	37
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	38
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	38
3.4.1.	Horno secador.....	38
3.4.2.	Tamizador.....	40
3.4.3.	Divisor de muestras rotatorio.....	41
3.4.4.	Divisor 70 XL (rifle).....	42
3.4.5.	Divisor 15 FXL (rifle).....	43
3.5.	Técnica cuantitativa.....	44
3.5.1.	Procedimiento para determinar los porcentajes que representan los diferentes tamaños de partícula y la distribución promedio de la partículas en función del tamaño de las mismas.....	44
3.5.1.1.	Muestreo en pala de cargador frontal.....	44
3.5.1.2.	Muestreo en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída	46
3.5.1.3.	Preparación de la muestra para análisis granulométrico.....	46
3.5.1.4.	Procedimiento de análisis granulométrico.	47
3.5.2.	Procedimiento experimental para determinar el número de incrementos y la masa de los mismos	48
3.6.	Recolección de datos.....	49
3.7.	Procesamiento de la información.....	52
3.7.1.	Porcentaje que representan los diferentes tamaños de partícula.....	54

3.7.2.	Distribución promedio de las partículas en función del tamaño de partícula.....	55
3.8.	Análisis estadístico.....	56
3.8.1.	Prueba de bondad de ajuste ji cuadrada.....	56
3.8.1.1.	Determinación de ji cuadrada.....	57
3.8.1.2.	Determinación de ji cuadrada crítica.....	58
4.	RESULTADOS.....	61
4.1.	Muestreo estadístico óptimo en pala de cargador frontal y en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída.....	61
4.2.	Plan de muestra bruta.....	62
4.3.	Procedimiento óptimo de preparación de muestras para análisis granulométrico.....	63
4.3.1.	Procedimiento de preparación de muestras para verificación de calibración de un instrumento de reducción de tamaño de partícula por medio de un análisis granulométrico.....	63
4.3.2.	Procedimiento de preparación de muestras para determinar la frecuencia de tamaño de partícula de alguna muestra en específico.....	65
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	67
	CONCLUSIONES.....	73
	RECOMENDACIONES.....	75
	BIBLIOGRAFÍA.....	77
	APÉNDICES.....	79

ANEXOS..... 117

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Dimensionamiento de pala con base al tamaño máximo de partícula.....	11
2.	Pala de muestreo.....	12
3.	Pala de sobrepeso.....	12
4.	Segregación en cinta transportadora.....	13
5.	Dispositivo para muestreo en banda parada.....	21
6.	Toma de incremento haciendo un corte total de un chorro de material en caída.....	22
7.	Toma de incremento en pila.....	24
8.	Diagrama indicando dónde realizar incrementos en pila.....	25
9.	Toma de incremento en pala de cargador frontal.....	26
10.	Muestreo en descarga de camión.....	27
11.	Diagrama de flujo preparación de muestra de carbón.....	31
12.	Horno secador.....	39
13.	Tamizador.....	40
14.	Divisor de muestras rotatorio.....	41
15.	Divisor 70 XL (rifle).....	42
16.	Divisor 15 FXL (rifle).....	43
17.	Muestreo en pala de cargador frontal.....	50
18.	Muestreo en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída.....	51
19.	Tabulación de datos de análisis granulométricos.....	52

20.	Diagrama de flujo de preparación de muestras para verificación de calibración de un instrumento de reducción de tamaño de partícula por medio de un análisis granulométrico.....	64
21.	Diagrama de flujo de preparación de muestras para determinar la frecuencia de tamaño de partícula de alguna muestra en específico.....	66

TABLAS

I.	Clasificación de carbón mineral por clase y grupo.....	5
II.	Componentes en porcentajes de diferentes clases de carbón...	6
III.	Componentes de las cenizas y sus rangos en porcentajes.....	8
IV.	Dimensiones para el dimensionamiento de la pala con base al tamaño máximo de partícula.....	11
V.	Número de incrementos a realizar y masa del incremento en función del tamaño de la partícula para un propósito general de muestreo.....	15
VI.	Principales diferencias entre muestreo manual y mecanizado..	16
VII.	Clasificación de muestreo en orden de preferencia.....	17
VIII.	Normas ASTM e ISO para los diferentes tipos de muestreo para la toma de muestra bruta de carbón.....	18
IX.	Clasificación de preparación de muestras de acuerdo a procedimiento.....	28
X.	Masa mínima requerida para un top-size determinado en la preparación de muestras.....	30
XI.	Simbología para diagrama de flujo.....	32
XII.	Ensayos para determinar variables de análisis próximo.....	34
XIII.	Ensayos para determinar variables de análisis final.....	35

XIV.	Comparación de la denominación de tamices y su tamaño respectivo.....	36
XV.	Especificaciones técnicas horno secador.....	39
XVI.	Especificaciones técnicas tamizador.....	40
XVII.	Especificaciones técnicas divisor de muestras rotatorio.....	41
XVIII.	Especificaciones técnicas divisor 70 XL (rifle).....	42
XIX.	Especificaciones técnicas divisor 15 FXL (rifle).....	43
XX.	Masa mínima de la muestra bruta para análisis de granulometría	45
XXI.	Masa mínima requerida en función del tamaño del carbón para preparación de las muestras.....	47
XXII.	Variación en la cantidad de incrementos a masa constante para muestreo en pala de cargador frontal y en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída.....	48
XXIII.	Variación de la masa a número de incrementos constante para muestreo en pala de cargador frontal y en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída.....	49
XXIV.	Tabulación de las masas en los diferentes tamices.....	53
XXV.	Cálculo del porcentaje retenido por el tamiz.....	54
XXVI.	Muestra de tabla de distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula.....	55
XXVII.	Cálculos para determinar ji cuadrada.....	58
XXVIII.	Muestreo estadístico óptimo en pala de cargador frontal.....	61
XXIX.	Muestreo estadístico óptimo en cinta transportadora haciendo un corte total en un chorro de material en caída.....	61

XXX.	Plan de toma de muestra bruta conformado por dos puntos de toma de muestras y sus especificaciones respectivas.....	62
------	---	----

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Cm	Centímetro
F_e	Distribución de frecuencia de referencia
F_o	Distribución de frecuencia observada
F_n	Frecuencia en el tamiz n
e	Frecuencia respectiva de referencia
o	Frecuencia respectiva observada
°C	Grados Celsius
GL	Grados de libertad
g	Gramo
Hz	Hertz
H_a	Hipótesis alternativa
H₁	Hipótesis de trabajo número uno
H₂	Hipótesis de trabajo número dos
H_o	Hipótesis nula
χ²	Ji cuadrada
kg	Kilogramo
lb	Libra
m_t	Masa total de los tamices
m_n	Masa retenida en el tamiz n
mL	Mililitro
mm	Milímetro
Kj/Kg	Poder calorífico (SI)
BTU/lb	Poder calorífico (sistema inglés)

%	Porcentaje
R_n	Porcentaje retenido en el tamiz n
“	Pulgada
T_n	Tamaño del tamiz n
N_n	Tamiz n
V	Voltio

GLOSARIO

Análisis granulométrico	Proceso a través del cual la muestra bruta es pasada por una serie de tamices para determinar su granulometría.
Incremento	Una porción de carbón tomada en una operación de muestreo con un instrumento de muestreo en forma manual o mecanizada, dependiendo del top-size del carbón. (En relación al carbón la palabra incremento no tiene relación con el significado de aumento)
Muestra bruta	Una cantidad definida de incrementos que representa un lote o sublote tomada con instrumento de muestreo.
Muestreo	Proceso de colección de incrementos en un lote de carbón para formar una muestra bruta que representa todo el lote o sublote, esta operación puede ser realizada en forma manual o automática.
Lote	Una cantidad discreta de carbón la cual será muestreada para determinar su calidad con una adecuada precisión.

Preparación de la muestra

Proceso que se efectúa sobre la muestra bruta para llevarla a una condición requerida para análisis y que mantenga su representación del lote. Este proceso incluye trituración, homogenización, división, mezcla y en ocasiones secado.

Top-Size

Al realizar el análisis de granulometría de un carbón es el tamaño de la malla de una serie de ellas, en la cual es retenido no más del 5 % de la muestra bruta, este concepto es muy importante para su aplicación en muchos aspectos de los procesos de muestreo, preparación de muestras y análisis.

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo principal el diseño de un plan de muestreo de carbón mineral tomando como referencia el patrón establecido por la Norma ASTM D 4749 – 07 y su posterior confirmación estadística a través de la prueba de bondad de ajuste ji cuadrada. El plan de toma de muestra bruta contempla el muestreo en dos lugares específicos, el primero en la pala de cargador frontal y el segundo en una cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída.

Se determinó la distribución de frecuencia del patrón para cada punto de muestreo y después se hizo variar la masa de los incrementos y el número de los incrementos, con lo cual se obtuvo el muestreo estadístico óptimo en pala de cargador frontal y en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída.

El muestreo estadístico óptimo se calculó por medio del análisis estadístico a través de la prueba de bondad de ajuste ji cuadrada con un mínimo de significancia del 90 por ciento.

Se realizaron dos procedimientos óptimos para la preparación de muestras para análisis granulométrico, el primero fue el procedimiento de preparación de muestras para verificación de calibración de un instrumento de reducción de tamaño de partícula y el segundo fue el procedimiento de preparación de muestras para determinar la frecuencia de tamaño de partícula.

OBJETIVOS

General

Diseñar un plan de muestreo de carbón mineral tomando como referencia el patrón establecido por la Norma ASTM 4749 – 07, método de prueba estándar para la realización de análisis granulométrico de carbón y designación de tamaño, y confirmación estadística por medio de la prueba de bondad de ajuste ji cuadrada.

Específicos

1. Determinar el muestreo estadístico óptimo para el muestreo en pala de cargador frontal y cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída.
2. Diseñar y elaborar un plan de toma de muestra bruta.
3. Determinar el procedimiento óptimo de preparación de muestras para análisis granulométrico.

Hipótesis

Hipótesis de trabajo

H₁: Es posible poner en marcha el proceso de control de calidad de carbón mineral por medio del diseño y elaboración del plan de toma de muestra bruta, el cual se validará por el tamaño de partícula observada.

H₂: Es posible realizar un plan de toma de muestra bruta que incluya la cantidad de incrementos a realizar, así como también, la masa de los mismos.

Hipótesis estadísticas

H₀: No existe diferencia significativa entre la distribución de frecuencia de tamaño de partícula observada y la distribución de frecuencia de tamaño de partícula de referencia, para el muestreo en pala de cargador frontal y en cinta transportadora, haciendo un corte total de un chorro de material en caída.

$$H_0 : F_o = F_e$$

H_a: Existe diferencia significativa entre la distribución de frecuencia de tamaño de partícula observada y la distribución de frecuencia de tamaño de partícula de referencia para el muestreo en pala de cargador frontal y en cinta transportadora, haciendo un corte total de un chorro de material en caída.

$$H_a : F_o \neq F_e$$

INTRODUCCIÓN

La elaboración de un plan de toma de muestra bruta por medio de métodos de muestreo es de vital importancia, para cualquier empresa que desee llevar a cabo un control de calidad de sus productos, la industria generadora de energía por medio de termoeléctricas operadas a carbón mineral no es la excepción.

La combustión del carbón tiene como productos gases nocivos para la salud y dañinos para el medio ambiente, pero es posible mitigar el impacto de los gases teniendo implementado un riguroso control de calidad. El control de calidad comienza con el muestreo, siendo esta acción un paso fundamental ya que si no se realiza de la manera adecuada, los pasos siguientes de preparación de las muestras y análisis de las mismas van a tener resultados erróneos.

Siendo el muestreo un proceso de vital importancia para garantizar un debido control de la calidad, es indispensable contar con un plan de toma de muestra bruta el cual tenga contemplado el muestreo en lugares específicos, como también, la cantidad de incrementos a tomar y la masa de los mismos. Debido a esta necesidad se elaboró un plan de toma de muestra bruta determinado por el muestreo estadístico óptimo. También se llevó a cabo la realización de dos procedimientos de preparación de muestras para análisis granulométrico.

1. ANTECEDENTES

En los recientes años el diseño de un plan de muestreo para carbón mineral no se había llevado a cabo en Guatemala debido a que no era necesario, puesto que no habían centrales termoeléctricas operadas con carbón mineral en el país. En la actualidad se encuentran operando tres centrales de esta índole y se espera que a corto plazo entren en funcionamiento otras dos más.

El antecedente más cercano a la temática de investigación proviene de un trabajo de graduación “¹ Evaluación de admixturas minerales para concreto de acuerdo a la Norma COGUANOR NGO 41 044 87, Muestreo y métodos de análisis de cenizas volantes de carbón y puzolanas naturales empleadas como aditivo mineral al hormigón (concreto) de cemento Portland. En él se lleva a cabo la implementación de la norma previamente dicha, la cual tiene como objetivo establecer el muestreo y los métodos de ensayo para las cenizas volantes de carbón y para puzolanas naturales o no, empleadas como aditivo mineral al hormigón (concreto) de cemento portland.

¹. Ref. No.2 CASTAÑEDA, Sergio. Evaluación admixturas minerales para concreto de acuerdo a la Norma Coguanor NGO 41 044 97.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Origen del carbón mineral

El carbón proviene de los restos de materia vegetal que fue depositada en el fondo de pantanos prehistóricos, donde fue cubierta por sedimentos por millones de años dando paso a la formación de la turba la cual es la precursora del carbón. La turba se formó mediante la acción bioquímica por parte de bacterias, las acciones subsiguientes de calor, presión y otros fenómenos físicos transformaron la turba para convertirla en las diversas clases de carbón que se conocen en la actualidad.

2.1.1. Clasificación del carbón

El carbón mineral es un material heterogéneo, que varia de acuerdo con los componentes de la planta que le dio origen y el grado de cambio metamórfico. Las variaciones en la edad ocasionan variaciones en la clase y/o grupo a la cual el carbón es designado.

La clasificación más utilizada es la establecida por la American Society of Testing Material (ASTM), la cual se basa en el contenido de carbón fijo y el poder calorífico, calculado para una base libre de material mineral.

La tabla de clasificación del carbón lo clasifica por clase, desde el lignito en el extremo inferior de la escala, pasando por los carbones bituminosos hasta llegar a la antracita en el extremo superior. Además de clasificarse por clase,

también se hace la clasificación por grupo dentro de cada clase. El índice de aglomeración se utiliza para establecer diferencias entre grupos adyacentes.

Se considera que los carbones se aglomeran si la muestra restante de coque, en la prueba para detectar materia volátil, soporta un peso de 500 gramos, si la muestra se dilata o si tiene una estructura celular porosa.

Los carbones de categorías bajas, es decir, con un contenido de carbono fijo menor al 69 por ciento se clasifican según su poder calorífico sobre una base húmeda libre de material mineral. Carbones que contengan un 69 por ciento o más de carbono fijo sobre base seca y libre de material mineral, se clasifican de acuerdo al contenido en carbono fijo, sin tener en cuenta el poder calorífico bruto.

La determinación del poder calorífico se considera sobre base húmeda y la determinación del carbón fijo se considera sobre base seca, ambos libres de material mineral.

2.1.2. Clasificación según su uso

El carbón, también puede ser clasificado según su uso, las dos clasificaciones son: de uso térmico y carbón de uso metalúrgico. El carbón de uso térmico se utiliza para la generación de calor y vapor en procesos industriales, se clasifican comercialmente por su poder calorífico, cantidad de carbono, humedad y azufre. El carbón de uso metalúrgico se utiliza en la reducción de minerales en procesos metalúrgicos, se clasifica por su capacidad de aglomerante, contenido de materia volátil, ceniza y azufre.

2.1.3. Composición del carbón

La composición del carbón depende del tipo de material orgánico de donde procede, la localización de la mina, las condiciones físicas durante su transformación, la profundidad de las capas y por último, el tratamiento durante y después del minado.

Tabla II. Componentes en porcentajes de diferentes clases de carbón

Componente	Unidad	Clase de carbón			
		Lignito	Subbituminoso	Bituminoso	Antracita
Humedad	%	25 - 45	10 - 25	2 - 15	3 - 6
Materia volátil	%	24 - 32	28 - 45	15 - 45	2 - 12
Carbón fijo	%	25 - 30	30 - 57	50 - 70	75 - 85
Cenizas	%	3 - 15	3 - 10	4 - 15	4 - 15
Azufre	%	0,3 - 2,5	0,3 - 1,5	0,5 - 6	0,5 - 2,5
Hidrógeno	%	6 - 7,5	5,5 - 6,5	4,5 - 6	1,5 - 3,5
Carbono	%	35 - 45	55 - 70	65 - 80	75 - 85
Nitrógeno	%	0,6 - 1,0	0,8 - 1,5	0,5 - 2,5	0,5 - 1
Oxígeno	%	38 - 48	15 - 30	4,5 - 10	5,5 - 9
Poder calorífico	Btu/lb	6000-7500	7500 - 10000	12000-14500	12000-13500
Densidad	g/mL	1,40 - 1,45	1,35 - 1,40	1,28 - 1,35	1,35 - 1,70

Fuente: SPEIGHT, James G. *Handbook of coal analysis*. p. 42.

2.1.3.1. Humedad

La humedad total del carbón está conformada por la humedad superficial o humedad libre, que es la humedad adquirida por el carbón después del minado, y la humedad inherente conocida también, como humedad ligada o de equilibrio, es la humedad del carbón en el manto. El exceso de humedad superficial causa problemas de manejo, como atascamientos de molinos, ductos y tolvas.

2.1.3.2. Materia volátil

Es el producto de la descomposición térmica del carbón cuando es sometido a calentamiento a 950 grados centígrados en ausencia de oxígeno, está compuesto de alquitranes y gases con alto contenido de hidrógeno y oxígeno. Los carbones con más alto contenido de materia volátil combustionan más fácilmente que los que poseen bajo contenido de materia volátil.

2.1.3.3. Carbón fijo

Es el residuo que queda después de que se retira la materia volátil y se calcula restando de 100 los porcentajes de humedad, materia volátil y cenizas obtenidas del análisis próximo.

2.1.3.4. Cenizas

Son los residuos inorgánicos que permanecen después de que se quema el carbón, en condiciones específicas. Las cenizas están conformadas por las cenizas libres, que son las adquiridas por efectos de la minería y el manejo del carbón y las cenizas inherentes, que son las que tiene el carbón en el manto.

Las cenizas inherentes se componen, en su mayor parte, de compuestos de silicio, aluminio, hierro, calcio y cantidades significativamente menores de compuestos de magnesio, sodio, potasio y titanio.

El conocimiento de la composición de las cenizas de carbón es de gran utilidad para estimar, en cierta medida, el ensuciamiento y la corrosión de las superficies para transmisión de calor en los hornos que operan con carbón pulverizado.

Tabla III. **Componentes de las cenizas y sus rangos en porcentajes**

Compuesto (óxido)	%
SiO ₂	20 – 60
Al ₂ O ₃	10 – 35
Fe ₂ O ₃	5 – 35
CaO	1 – 20
MgO	0,3 – 4
TiO ₂	0,5 – 2,5
Na ₂ y K ₂ O	1 – 4
SO ₃	0,1 – 1,2

Fuente: PERRY, Robert H: GREEN, Don W. *Manual del ingeniero químico*. p. 27-7.

2.1.3.5. Azufre

El azufre se presenta en el carbón de tres formas, como pirita (FeS₂); como azufre orgánico que es parte de las sustancias del carbón, y como azufre en sulfatos.

El azufre en sulfatos comprende, cuanto mucho, unas cuantas centésimas de porcentaje del carbón. El azufre orgánico puede representar del 20 al 80 por ciento del azufre total. Puesto que el azufre orgánico está enlazado químicamente a las sustancias del carbón de manera compleja, se requiere de un tratamiento drástico para romper los enlaces químicos antes de poder separar el azufre. No se conoce en la actualidad ningún método económico que permita eliminar el azufre orgánico, pero se han realizado grandes progresos con los llamados métodos químicos para la depuración del carbón. El azufre pirítico se puede eliminar parcialmente con equipos normales para el lavado del carbón. El grado de eliminación depende del tamaño del carbón y distribución de las partículas de pirita.

2.1.3.6. Poder calorífico

Es la cuantificación de la cantidad total de energía por unidad de masa que el carbón puede liberar durante el proceso de combustión. Expresa la energía máxima que puede liberar la unión química entre el combustible y el comburente, la cual es igual a la energía que mantiene unidos a los átomos en las moléculas debido a la combustión.

El poder calorífico disminuye a medida que aumenta la humedad y las cenizas. Aproximadamente cada uno por ciento de aumento de la humedad representa una pérdida de 100 a 120 BTU y cada 1 por ciento de aumento en cenizas representa una pérdida de 100 a 150 BTU.

2.2. Muestreo de carbón

El propósito de tomar un incremento es el de obtener las características del lote total, sin tener que efectuar una inspección del 100 por ciento del

mismo. Por supuesto que la inspección del 100 por ciento del lote proporcionaría una información exacta de la composición pero esto no sería práctico y demandaría de una cantidad elevada tanto de tiempo como de dinero. Debido a esto es necesario coleccionar una muestra representativa del lote, pero que no sea tan grande que su análisis vaya a ser tardado y costoso, pero lo suficientemente grande para que represente al lote en su totalidad. A esta se le llama muestra bruta, la cual está compuesta por una cantidad de incrementos determinados por métodos estadísticos, como también se determina la masa de los incrementos.

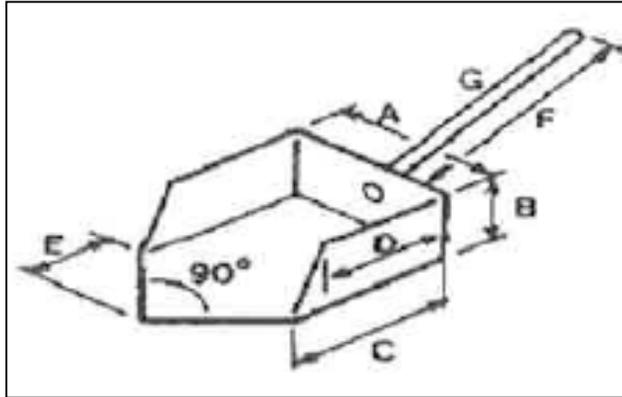
2.2.1. Factores a tener en cuenta al realizar el muestreo

La persona encargada de realizar el muestreo de carbón debe de tener en cuenta 4 diferentes factores para la correcta recolección de los incrementos a ser analizados.

2.2.1.1. Instrumento de muestreo

Es necesario tener la herramienta adecuada para realizar la toma de incrementos. La misma herramienta no va a ser útil para la toma de incrementos en diferentes dispositivos de transporte, además el tamaño de partícula es una variable importante en la elección de la herramienta de muestreo. Por recomendación de las Normas ISO y ASTM referente a la capacidad para albergar la masa del incremento, se recomienda que el ancho de la parte frontal del dispositivo de muestreo debe de ser, por lo menos 2,5 veces el top-size del carbón a muestrear.

Figura 1. Dimensionamiento de pala con base al tamaño máximo de partícula



Fuente: SGS. *Curso básico de muestreo de carbón*. p. 43.

Tabla IV. Dimensiones para el dimensionamiento de la pala con base al tamaño máximo de partícula

No. pala	Tamaño máximo de partícula (mm)	Dimensiones de la pala (mm)					Espesor de material (mm)	Relación		Volumen aproximado (mL)
		a	b	c	d	e		a/c	b/c	
125	125	300	120	300	250	120	2	1	0,40	10 000,00
100	100	250	110	250	220	100	2	1	0,44	7 000 00
75	75	200	100	200	170	80	2	1	0,50	4 000,00
50	50	150	75	150	130	65	2	1	0,50	1 700,00
40	40	110	65	110	95	50	2	1	0,59	790
30	30	90	50	90	80	40	2	1	0,56	400
20	20	80	45	80	70	35	2	1	0,56	300
15	15	70	40	70	60	30	2	1	0,57	200
10	10	60	35	60	50	25	1	1	0,58	125
5	5	50	30	50	40	20	1	1	0,60	75
3	3	40	25	40	30	15	0,5	1	0,62	40
1	1	30	15	30	25	12	0,5	1	0,60	15
0,25	0,25	15	10	15	12	9	0,3	1	0,67	2

Fuente: SGS. *Curso básico de muestreo de carbón*. p. 43.

Para la toma de incrementos en pilas, pala de cargador frontal y cuchara de grúa se utiliza, generalmente, una pala para carbón como se muestra en figuras 2 y 3.

Figura 2. **Pala de muestreo**



Fuente: SGS. *Curso básico de muestreo de carbón*. p. 18.

Figura 3. **Pala de sobrepeso**



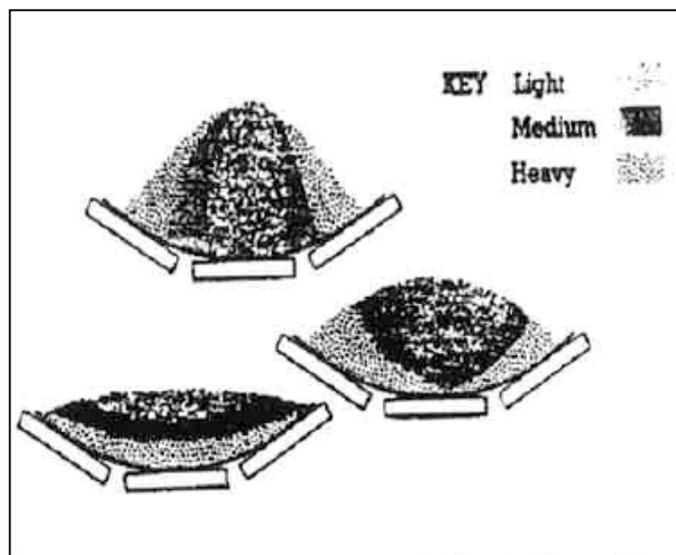
Fuente: SGS. *Curso básico de muestreo de carbón*. p. 18.

Para la toma de incrementos en una caída de corriente de carbón en la unión de dos cintas transportadoras se utiliza una copa de muestreo.

2.2.1.2. Segregación

Es la clasificación de las partículas debido al movimiento, esto no solo ocurre entre partículas grandes y pequeñas, sino también entre partículas pequeñas y muy pequeñas, lo cual no se puede notar a simple vista. Las partículas al estar mezcladas y encontrarse en movimiento se segregan por tamaño. La segregación, generalmente se da por tamaño de partícula, pero también puede darse por forma, densidad, contenido de humedad y textura.

Figura 4. Segregación en cinta transportadora



Fuente: SGS. *Curso básico de muestreo de carbón*. p. 12.

2.2.1.3. Masa del incremento

La masa mínima del incremento está determinada por el top-size de la partícula. Dado que es necesario que el incremento contenga todos los tamaños de partícula presentes en esa porción del lote, se determinó que esto se logra si la masa del incremento es, por lo menos 1 000 veces el tamaño de la partícula más grande. Esto es fácil de conseguir en productos granulados pequeños, pero es muy complicado en el muestreo de carbón. La tabla V muestra la masa que se debe tomar en función al tamaño de partícula.

2.2.1.4. Número de incrementos

El número de incrementos a ser recolectados depende de dos factores principales: el primero es la variabilidad del material, y el segundo el grado de precisión requerido en el resultado final. En productos donde existe una gran variabilidad en el tamaño o composición, va a ser necesario un mayor número de incrementos para asegurarse que todas las características se encuentren representadas en la muestra bruta. La tabla V muestra el número de incrementos mínimo que se deben tomar en función del tamaño de partícula.

Tabla V. **Número de incrementos a realizar y masa del incremento en función del tamaño de la partícula para un propósito general de muestreo**

Tamaño máximo de partícula	pulgada	mm	pulgada	mm	pulgada	mm
	5/8	16	2	50	6	150
Carbón limpiado mecánicamente						
Número mínimo de incrementos	15		15		15	
Masa mínimo de incremento (Kg)	1		3		7	
Carbón sin limpiar						
Número mínimo de incrementos	35		35		35	
Masa mínimo de incremento (Kg)	1		3		7	

Fuente: ASTM, American Society of Testing Material, D 2234 / D 2234 M. p. 4.

La tabla V está elaborada con base en el lote al que se le va a efectuar el muestreo, este igual o menor a 1 000 toneladas. Si la cantidad de carbón es superior a 1000 toneladas se pueden seguir dos alternativas para determinar la cantidad de incrementos a realizar.

- Seguir utilizando la tabla V, lo cual significa continuar tomando incrementos cada 1 000 toneladas.
- Determinar la cantidad de incrementos por medio de la siguiente fórmula.

$$N = K \sqrt{\frac{L}{100}}$$

Ecuación 1

Donde:

N = número de incrementos a realizar

L = masa del lote (Ton)

K= cantidad mínima de incrementos a tomar, su valor es 15 para muestreo mecánico y 35 para muestreo manual.

2.2.2. Métodos de muestreo

Existen dos métodos de muestreo: manual y mecánico.

- El muestreo manual es aquel en el que una persona designada para la tarea toma las muestras con un instrumento de muestreo manual.
- El muestreo mecánico es aquel en que la acción de tomar las muestras es realizada por un equipo mecanizado.

Las principales diferencias entre el muestreo manual y mecanizado se muestran en la tabla VI.

Tabla VI. **Principales diferencias entre muestreo manual y mecanizado**

Muestreo manual	Muestreo mecánico
Elevado gasto de mano de obra	Elevada inversión de capital
Diseñado para cargamentos de poca capacidad	Apropiado para cargamentos de gran capacidad
Susceptible a errores e influencia humana	Elevado nivel de precisión
Elevado nivel de versatilidad	Flujo continuo de material

Fuente: SGS. *Curso básico de muestreo de carbón*. p. 21.

2.2.3. Clasificación de los muestreos en orden de preferencia

Las Normas ASTM clasifican los muestreos en un orden de preferencia según se muestra en tabla VII.

Tabla VII. Clasificación de muestreo en orden de preferencia

Tipo de muestreo
1) Muestreo en banda parada
2) Muestreo haciendo un corte total de un chorro de material en caída
3) Muestreo haciendo un corte parcial de un chorro de material en caída
4) Muestreo estacionario (pilas, vagones, barcazas, buques y cargadores frontales)

Fuente: ASTM, American Society of Testing Material, D 2234 / D 2234 M. p. 4.

La clasificación de la preferencia en los tipos de muestreo se basa en la probabilidad de que al realizar un incremento, este contenga todos los tamaños de partículas existentes haciendo del tipo de muestreo, en particular, más representativo y eso conlleva más exactitud en los resultados. Por ejemplo, en el muestreo en banda parada, todas las partículas tienen la misma probabilidad de pertenecer al incremento, pero en el muestreo en pila no todas las partículas tienen esa misma probabilidad.

A continuación se describen los diferentes tipos de muestreos para la toma de muestra bruta de carbón y para análisis de granulometría, así como también, las condiciones particulares que se deben de tomar en cuenta. Las descripciones se apoyan en los lineamientos de las Normas ASTM e ISO.

Tabla VIII. **Normas ASTM e ISO para los diferentes tipos de muestreo para la toma de muestra bruta de carbón**

Norma	Nombre inglés	Nombre español
ASTM D 2234	Standard practice for collection of gross sample of coal	Práctica estándar para la toma de muestra bruta de carbón
ASTM D 4749	Standard test method for performing the sieve analysis of coal and designating coal size	Método de prueba estándar para la realización del análisis granulométrico de carbón y la designación del tamaño del carbón
ASTM D 6883	Standard practice for manual sampling of stationary coal from railroad , barges, trucks or stockpiles	Práctica estándar para el muestreo manual estacionario de carbón desde vagones de tren, barcasas y pilas
ISO 1953	Hard coal size analysis by sieving	Análisis de hulla por tamaño de tamizado
ISO 1988	Hard coal sampling	Muestreo hulla

Fuente: elaboración propia.

2.2.3.1. Condiciones particulares para los incrementos

- Recomendaciones por las Normas ISO y ASTM, referente a la capacidad para albergar la masa del instrumento: el ancho de la parte frontal del

dispositivo de muestreo sea por lo menos 2,5 veces el top-size del carbón a muestrear.

- Los incrementos de la muestra para análisis se almacenarán en recipientes cerrados impermeables y resistentes al manejo (bolsa de polietileno con saco), con su respectiva identificación, y la muestra para granulometría se almacenará en un recipiente resistente (saco).
- Las muestras para granulometría deben manejarse con sumo cuidado, evitando golpes, pesos sobre los sacos que las contengan y un largo transporte donde la vibración las degrade.
- La masa del incremento debe mantenerse lo más parecida, cada vez que se tome los diferentes incrementos sobre el lote.
- Llevar un control de la frecuencia de toma de incrementos y masa acumulada para el lote que se muestrea.
- Calcular la masa y número de incrementos tanto para análisis como para granulometría.

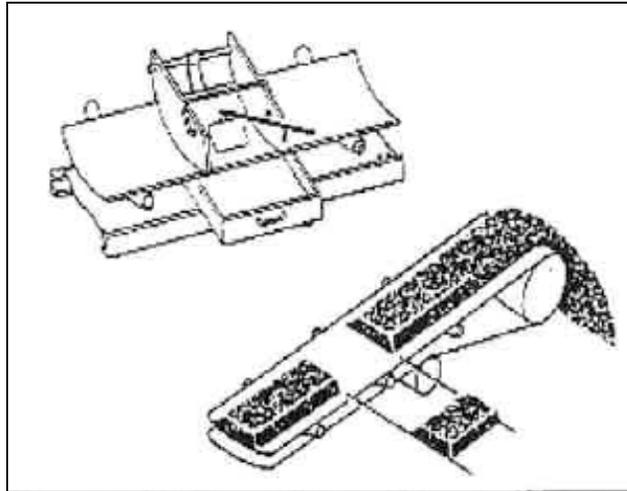
2.2.3.2. Muestreo en banda parada

La muestra de banda por estar clasificada en el más alto rango de precisión, es usada para evaluar el desempeño de muestreadores automáticos, ya sea por medio de un procedimiento de bias (test de parcialidad) estático o dinámico.

Consideraciones particulares que debe tener en cuenta el responsable de muestreo en banda transportadora parada.

- El dispositivo usado para este tipo de muestreo es un divisor, consta de dos láminas cuyos contornos inferiores tienen la misma figura de la sección transversal de la banda y, la separación entre ella es más de dos veces y media el top-size del carbón muestreado, como establecen las Normas ASTM / ISO.
- Los incrementos serán tomados periódicamente y se establecerán los números de paradas en banda, en común acuerdo con partes interesadas.
- Para que el incremento sea representativo, es necesario tomar toda la muestra que queda dentro del divisor, incluidos todos los finos, usando una brocha o cepillo para recogerlos.
- Debe de ser utilizado de acuerdo a un plan de muestro establecido y no solamente cuando las bandas se paren por razones operacionales.

Figura 5. **Dispositivo para muestreo en banda parada**



Fuente: SGS. *Curso básico de muestreo de carbón*. p. 22.

2.2.3.3. Muestreo haciendo un corte total de un chorro de material en caída

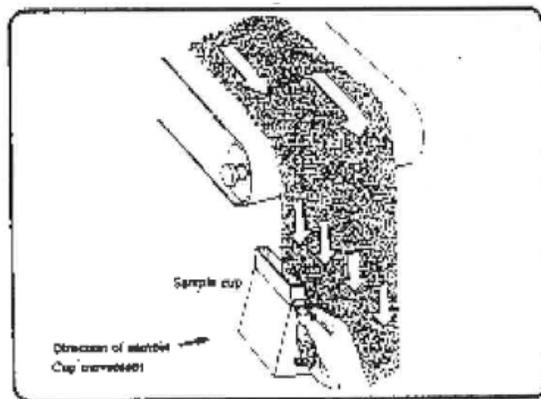
Este muestreo se realiza en los puntos de transferencia de dos bandas.

Consideraciones particulares que debe tener en cuenta el responsable del muestreo manual en el chorro de descarga de una banda.

- El punto de toma del incremento debe rotarse en diferentes puntos de la caída para contrarrestar la segregación.
- La masa del incremento debe mantenerse lo más constante posible cada vez que se tome los diferentes incrementos sobre el lote.

- El dispositivo de muestreo debe atravesar el chorro cada vez que tome un incremento y con tal rapidez, que el dispositivo de muestreo no se rebose.
- La herramienta de muestreo debe tener una apertura de mínimo 2,5 veces el top-size.

Figura 6. **Toma de incremento haciendo un corte total de un chorro de material en caída**



Fuente: SGS. *Curso básico de muestreo de carbón*. p. 24.

2.2.3.4. Muestreo haciendo un corte parcial de un chorro de material en caída

Consideraciones particulares que debe tener en cuenta el responsable del muestreo, haciendo un corte parcial de un chorro de material en caída.

- Rotar el punto de toma del incremento en diferentes posiciones del área transversal del mismo, con el fin de contrarrestar la segregación del carbón.

- La masa del incremento debe mantenerse lo más constante posible, cada vez que se tome los diferentes incrementos sobre el lote.
- El dispositivo de muestreo toma una porción del chorro de material en caída, no debe atravesar el chorro por completo.
- La herramienta de muestreo debe tener una apertura de mínima 2,5 veces el top-size.

2.2.3.5. Muestreo estacionario

Es todo aquel muestreo donde el carbón se encuentra apilado y sin movimiento, esto puede ser en pilas, pala de cargador frontal y camiones o tracto mulas.

2.2.3.5.1. Muestreo en pila

Consideraciones particulares que debe tener en cuenta el responsable de muestreo en pila.

- Revisar las condiciones ambientales de muestreo, tiempo de almacenamiento, contaminación y características de la pila.
- Hacer una inspección general de la pila para distribuir los incrementos sobre la superficie, de tal manera que representen igual área; observar las áreas de segregación, contaminación y forma de la pila.
- Hacer un informe con gráfica, detallando la forma de la pila, distribución de los incrementos, top-size aproximado por áreas, contaminación y otros

detalles como tiempo y forma de almacenamiento, procedencia, condiciones climatológicas antes y al momento de muestreo.

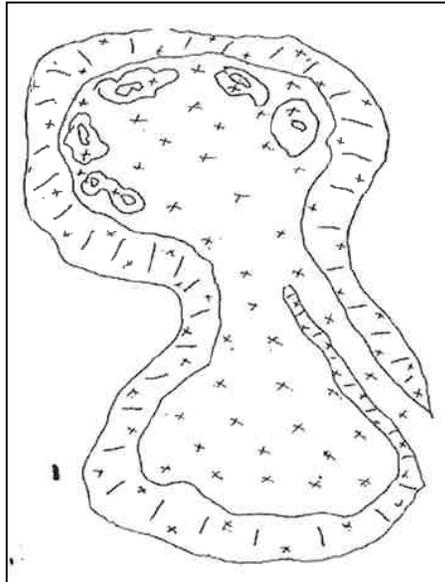
- Hacer uso de maquinaria, tal como buldócer o cargador frontal para penetrar la pila por los lados y, en su parte superior, para obtener un número mayor de incremento lo cual mejorará la precisión del muestreo.
- La herramienta de muestreo debe tener una apertura mínima 2,5 veces el top-size.

Figura 7. Toma de incremento en pila



Fuente: SGS. *Curso básico de muestreo de carbón*. p. 29.

Figura 8. **Diagrama indicando dónde se realizaron los incrementos en pila**



Fuente: SGS. *Curso básico de muestreo de carbón*. p. 31.

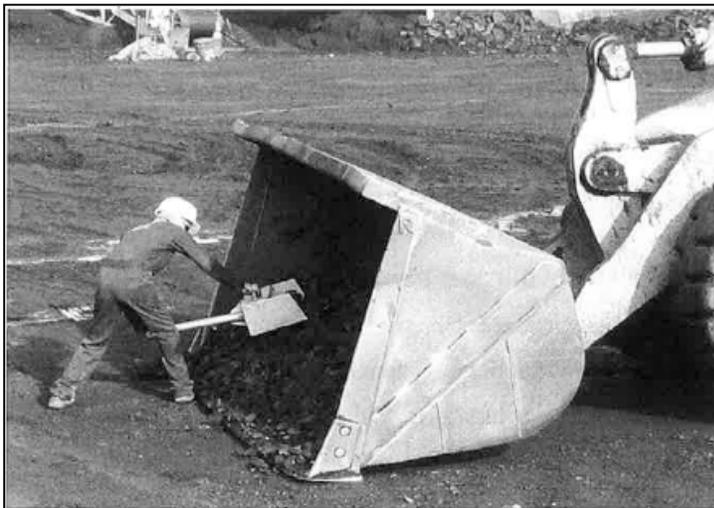
2.2.3.5.2. Muestreo en pala de cargador frontal

Consideraciones particulares que debe tener en cuenta el responsable de muestreo en pala de cargador frontal.

- Los incrementos deben de ser tomados, periódicamente en el transcurso de la carga y descarga.
- Los incrementos se deben de tomar en diferentes puntos de la pala del cargador, para contrarrestar la segregación.

- Tomar en cuenta que la secuencia del muestreo no coincida con el mismo punto donde está trabajando el cargador.
- Coordinar con el operador, para que coloque en el suelo el cucharón.

Figura 9. **Toma de incremento en pala de cargador frontal**



Fuente: SGS. *Curso básico de muestreo de carbón*. p. 26.

2.2.3.5.3. Muestreo de camiones o tracto mulas

Consideraciones particulares que debe tener en cuenta el responsable de muestreo de camiones o tracto mulas.

- Los incrementos deben tomarse alrededor del camión sobre las pilas formadas, como producto de la descarga.
- La distribución de los incrementos debe tomarse de tal manera, que no

afecta la segregación del carbón, incrementos en la parte baja de la pila (la mayoría tamaño grande), incrementos en la parte medio de la pila (la mayoría tamaño intermedio), e incrementos en el tope de la pila (la mayoría son finos).

- Realizar un orificio de 60 centímetros por debajo de la superficie, para poder tomar los incrementos.

Figura 10. **Muestreo en descarga de camión**



Fuente: SGS. *Curso básico de muestreo de carbón*. p. 27.

2.3. Preparación de muestras

La preparación de las muestras es el paso siguiente a la recolección de las mismas. Es necesario realizar esta actividad debido a que la muestra bruta, por lo general, es muy grande en tamaño para poderle realizar los análisis requeridos. La preparación se lleva a cabo en un laboratorio designado especialmente, para este propósito. El laboratorio cuenta con el equipo

necesario para la preparación de las muestras, el cual es descrito en la sección 3.4 (recursos materiales disponibles) del presente informe.

La preparación de las muestras se puede clasificar en 2 grupos con base en su estado. Estos dos grupos, a su vez, pueden ser subdivididos si es necesario que la muestra sea secada para determinar su contenido de humedad. Existe también, la preparación de muestras compuestas en las cuales para su realización es indispensable determinar varios parámetros. Entre estos están el método de muestreo del carbón; y si es para análisis, con parámetros aditivos o no aditivos.

Tabla IX. **Clasificación de preparación de muestra de acuerdo a procedimiento**

Procedimiento	Descripción
A	Carbón que ha sido limpiado
B	Carbón que no ha sido limpiado

Fuente: ASTM, American Society of Testing Material, D 2013 / D 2013 M 09. p. 1.

Es de vital importancia seleccionar adecuadamente el método de recolección de muestras con el cual se va a trabajar, debido a que el sesgo proveniente de la toma de muestra bruta va a permanecer en la muestra final. Los divisores utilizados de la manera correcta van a reducir el sesgo al final de la muestra, pero su eliminación no es posible.

Antes de hacer el procedimiento de preparación de la muestra, es necesario saber qué análisis se le va a realizar a la muestra, dado que diferentes análisis pudieran requerir una cantidad de masa y top-size distinto.

Es necesario considerar la cantidad de muestras a preparar, ya que pudiera ser requerido una muestra para determinar la humedad, la moldurabilidad e incluso guardar una muestra en caso de que se quisieran verificar los resultados.

Al llevar a cabo los diferentes procedimientos y procesos (manipulación de la muestras, reducción y división) de preparación de muestras, es necesario realizarlos de una manera rápida y en la menor cantidad de procesos posible, debido a que la pérdida de humedad depende de varios factores como el tiempo de trituración, temperatura ambiente y tipo de equipo.

Si durante la preparación o manipulación de una muestra, que fue previamente secada, ocurre algún acontecimiento que pudiera afectar el contenido de humedad, ya sea en pérdida o ganancia es necesario que la muestra o submuestra sea pesada y su humedad equilibrada a la del ambiente y subsiguientemente su pérdida o ganancia de masa usada para determinar el contenido de humedad.

El proceso de división de muestras en el divisor o en el divisor de muestras rotatorio es susceptible a cometer un error en la división, debido al top-size de la muestras. Para evitar esto es importante llevar a cabo un prueba de granulometría periódicamente del producto final de la trituradora.

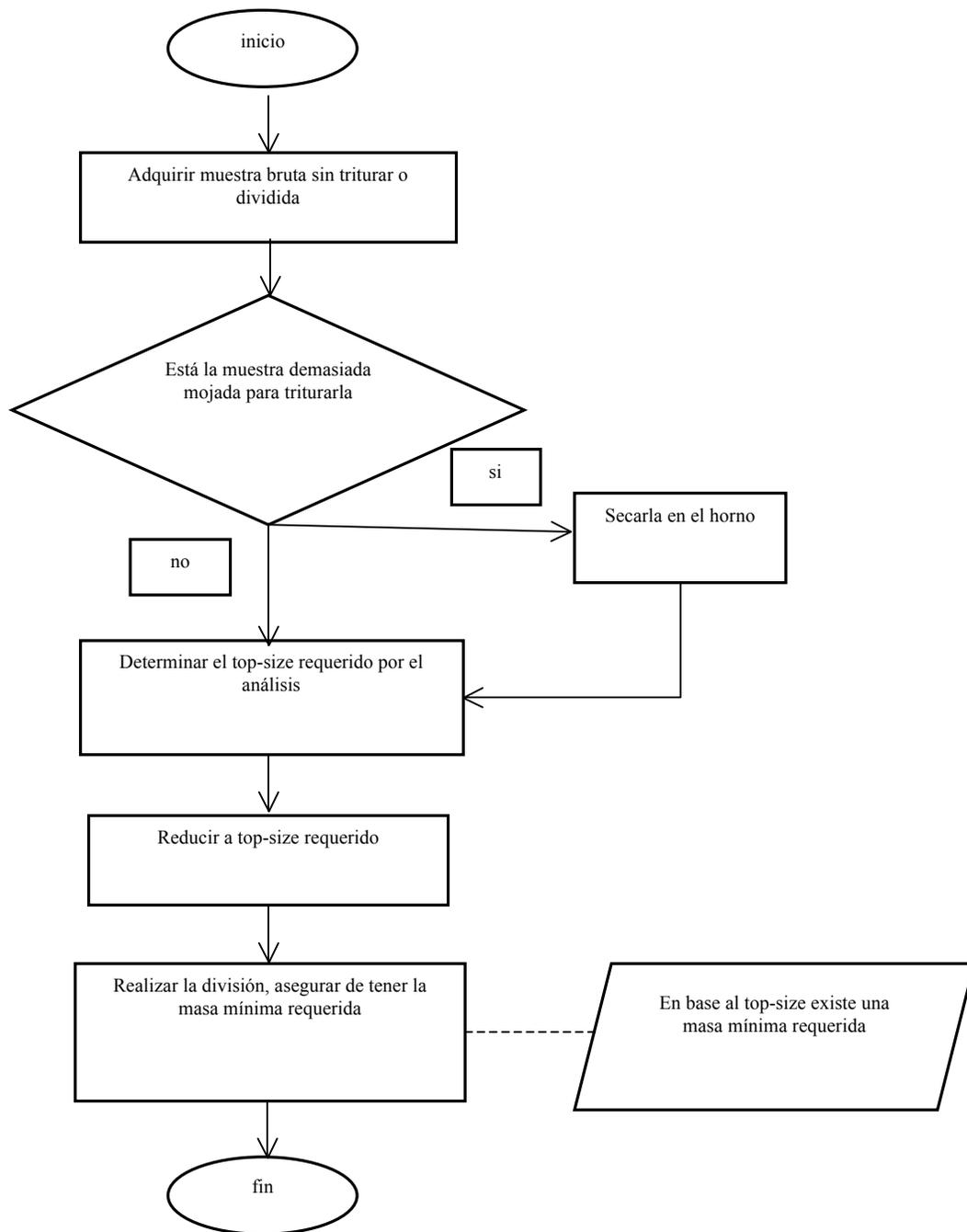
Tabla X. **Masa mínima requerida para un top-size determinado en la preparación de muestras**

Top – size *		Masa mínima (g) **	
Mesh No.	mm	Grupo A	Grupo B
4	4,75	2 000	4 000
8	2,35	500	1 000
20	850 μm	250	500
60	250 μm	50	50
<p>* Por lo menos debe de pasar el 95 por ciento del material por el tamiz designado.</p> <p>** Si la muestra es requerida para humedad, incrementar 500 gramos a la cantidad de masa para el mesh No. 4 y 8.</p>			

Fuente: ASTM, American Society of Testing Material, D 2013 / D 2013 M 09. p. 4.

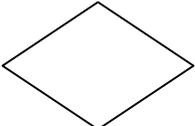
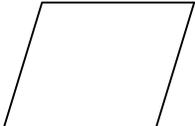
A continuación se presenta un procedimiento general para la preparación de muestras, el cual conlleva la reducción del tamaño de partícula y la división de la muestra.

Figura 11. Diagrama de flujo preparación de muestra de carbón



Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Simbología para diagrama de flujo**

Nombre	Símbolo	Significado
Inicio o final		Inicio o final de un procedimiento.
Proceso		Actividad que forma parte del procedimiento e incluye uso de cristalería y equipo.
Decisión		Permite escoger entre dos o más opciones antes de continuar con el proceso siguiente.
Datos		Información extra acerca de un proceso.

Fuente: elaboración propia.

2.3.1. Preparación de muestras para análisis granulométrico

Es importante mencionar que, para la preparación de las muestras para análisis granulométrico no se debe reducir el tamaño de las partículas, debido a que es exactamente el porcentaje que representan los diferentes tamaños lo que se quiere determinar.

La única acción que se realiza en la preparación de las muestras para análisis granulométrico, es la división de las mismas para tener una muestra que sea manejable, pero que también sea una representación de la muestra bruta.

La división de las muestras se lleva a cabo en un divisor o rifle el cual divide las muestras en dos partes iguales sin la intervención humana. Esta división ayuda a disminuir el sesgo. Una de las dos partes divididas se toma y la otra se desecha. Se sigue este procedimiento hasta obtener la masa mínima requerida.

2.4. Análisis de muestras

Es de gran importancia realizar análisis a las muestras de carbón para evaluar las características físicas, químicas y petrográficas del carbón. Con la realización de los análisis se caracteriza el carbón y de este modo se determina el tipo de carbón que mejor se adapte a las necesidades del equipo, ambientales, como también, económicas para cada industria en particular.

Básicamente se realizan dos tipos de análisis: el próximo y el último. Ambos expresados en porcentajes en peso. Con la realización de los dos ensayos se determinan los componentes que conforman al carbón.

2.4.1. Análisis próximo

El análisis próximo identifica el grado de carbonificación. Da información del comportamiento durante el calentamiento, es decir, cuánto del carbón permanece fijo y cuánto se transforma en materiales volátiles. Además se realizan ensayos de humedad y contenido de cenizas.

El análisis próximo es la determinación por métodos prescritos, de la humedad, materia volátil, carbón fijo y contenido de cenizas, en una muestra determinada.

La tabla XII contiene los métodos sugeridos por las Normas ASTM para determinar las variables del análisis próximo.

Tabla XII. **Ensayos para determinar variables de análisis próximo**

Variable a determinar	Método sugerido Norma ASTM
Humedad	D 3173
Cenizas	D 3174
Materia volátil	D 3175
Carbón fijo	Es la sumatoria de los porcentajes de humedad, cenizas, materia volátil , la cual se resta de 100 para obtener el resultado.

Fuente: ASTM, American Society of Testing Material, D 5142. p. 1.

2.4.2. Análisis final

Es la determinación por métodos prescritos, de carbono e hidrógeno en los gases de una combustión completa, determinación del contenido de azufre, nitrógeno, cenizas y la determinación del oxígeno por diferencia en balances.

La tabla XIII contiene los métodos sugeridos por las Normas ASTM para determinar las variables del análisis final.

Tabla XIII. **Ensayos para determinar variables de análisis final**

Variable a determinar	Método sugerido Norma ASTM
Carbono e hidrógeno	D 3178 y/o D 5373
Azufre	D 3177 y/o D 4239
Nitrógeno	D 3179 y/o D5373
Cenizas	D 3174 y/o D5142
Oxígeno	Es la sumatoria de los porcentajes de carbono, hidrógeno, azufre, nitrógeno, cenizas, la cual se resta de 100 para obtener el resultado.

Fuente: elaboración propia.

2.5. Granulometría

El análisis de tamices es utilizado para determinar la distribución de tamaños de partícula, se lleva a cabo cerniendo las partículas de carbón a través de una serie de tamices. El número de los tamices indica las aperturas del tamiz por pulgada lineal. Cada tamiz tiene un diámetro igual a la mitad del diámetro del tamiz que le precede. El uso de todos los tamices dependerá de la precisión que se requiera o de las especificaciones, ya que en ocasiones solamente se utilizarán algunos de ellos.

Los tamices se pueden clasificar en dos grupos: con malla circular y con malla cuadrada.

Tabla XIV. **Comparación de la denominación de tamices y su tamaño tamaño**

Serie estándar en USA		Tyler (mesh)
Estándar	Alternativo	
5,60 mm	No. 3 1/2	3 1/2
4,75 mm	No. 4	4
4,00 mm	No. 5	5
3,35 mm	No. 6	6
2,80 mm	No. 7	7
2,36 mm	No. 8	8
2,00 mm	No. 10	9
1,70 mm	No. 12	10
1,40 mm	No. 14	12
1,18 mm	No. 16	14
1,00 mm	No. 18	16
850 μm	No. 20	20
710 μm	No. 25	24
600 μm	No. 30	28
500 μm	No. 35	32
425 μm	No. 40	35
355 μm	No. 45	42
300 μm	No. 50	48
250 μm	No. 60	60
212 μm	No. 70	65
180 μm	No. 80	80
150 μm	No. 100	100
125 μm	No. 120	115
106 μm	No. 140	150
90 μm	No. 170	170
75 μm	No. 200	200
63 μm	No. 230	250
53 μm	No. 270	270

Fuente: ASTM, American Society of Testing Material, D 4749 -07. p. 4.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

La primera variable que se tomó en cuenta es el tamaño de partícula, debido a que los instrumentos de muestreo están basados en el tamaño máximo de partícula, como también, el número mínimo de incrementos y la masa de los mismos según la tabla V.

La segunda variable que se tomó en cuenta es la distribución promedio de las partículas en función al tamaño de las mismas.

La tercera variable es el número de incrementos, esta fue una de las incógnitas a determinar para tener el plan de toma de muestras brutas.

La cuarta variable es la masa de los incrementos, esta al igual que el número de incrementos, se determinó para llevar a cabo la elaboración del plan de toma de muestra bruta.

3.2. Delimitación del campo de estudio

La elaboración del plan de toma de muestra bruta que se llevó a cabo fue para las especificaciones de la planta termoeléctrica y los lugares específicos donde se tomaron los incrementos en las palas de los cargadores frontales, como también, en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída, ambos muestreos se realizaron manualmente.

3.3. Recurso humano disponible

- Investigador : Br. Ynse Joseph Holwerda Girón
- Asesora: Inga. Qca. Telma Maricela Cano Morales
- Asesor: Ing. Qco. Mario José Mérida Meré

3.4. Recursos materiales disponibles

Para la realización del muestreo se dispuso de cargadores frontales, este se llevó a cabo en la pala de los mismos. También se contó con cintas transportadoras en las cuales se realizó el corte total de un chorro de material en caída.

No se contaba con la pala con la cual se realizó la toma de los incrementos en pala de cargador frontal, tampoco se tenía con la copa para realizar la toma de incrementos en la unión de las cintas transportadoras, de modo que fue necesario tomar las consideraciones del numeral 2.2.1.1., la figura 1 y la tabla IV para poder realizarlas.

3.4.1. Horno secador

El horno secador está diseñado para lograr que el carbón alcance el equilibrio con la temperatura del cuarto antes de su posterior reducción o división en acuerdo a la Norma ASTM D 2013.

Tabla XV. **Especificaciones técnicas horno secador**

Especificaciones	Descripción
Marca	Preiser Scientific
Modelo	200
Número de ítem en catálogo	Z 91-2290-81
Voltaje	230 v
Fases del motor	Monofásico
Suministro de energía	50 Hz
Temperatura de operación	0 a 105 grados fahrenheit
Cantidad de estanterías	6
Método térmico	Convección
Dimensiones	35 pulgadas ancho, 78 ½ pulgadas alto y 29 ½ pulgadas largo
Peso	290 libras
Otros	Control digital de la temperatura y dos temporizadores de 24 horas cada uno

Fuente: Ficha técnica del equipo.

Figura 12. **Horno secador**



Fuente: Ficha técnica del equipo.

3.4.2. Tamizador

El tamizador Ro – Tap RX – 29 está diseñado para operar con movimiento circular horizontal y movimiento vertical de martilleo.

Tabla XVI. **Especificaciones técnicas tamizador**

Especificaciones	Descripción
Marca	Haven & Boecker Tyler
Modelo	Ro – Tap RX - 29
Número de ítem en catálogo	Z 91-9184-01
Voltaje	110 v
Fases del motor	Monofásico
Suministro de energía	60 Hz
Dimensiones	28 pulgadas ancho, 21 pulgadas largo, 25 pulgadas alto
Peso	190 libras
Cantidad de tamices incluidos	6

Fuente: Ficha técnica del equipo.

Figura 13. **Tamizador**



Fuente: Ficha técnica del equipo.

3.4.3. Divisor de muestras rotatorio

El divisor de muestras proporciona una rápida y precisa división, también puede ser empleado para mezclar las muestras.

Tabla XVII. **Especificaciones técnicas divisor de muestras rotatorio**

Especificaciones	Descripción
Marca	Preiser Scientific
Número de ítem en catálogo	FRS – 440749 A
Voltaje	230 v
Fases del motor	trifásico
Suministro de energía	50 Hz
Dimensiones	33 pulgadas ancho, 56 pulgadas largo, 44 pulgadas alto
Peso	235 libras
Otros	Posee una tolva con un volumen de 51 litros

Fuente: Ficha técnica del equipo.

Figura 14. **Divisor de muestras rotatorio**



Fuente: Ficha técnica del equipo.

3.4.4. Divisor 70 XL (rifle)

El divisor 70 XL es un modelo totalmente cerrado, elaborado en acero inoxidable, consiste en conductos de alimentación, caños y cajones de acero inoxidable 304. Contiene 18 caños, los cuales poseen un ancho de $\frac{3}{4}$ pulgada. La unidad es un modelo para utilización en el piso.

Tabla XVIII. **Especificaciones técnicas divisor 70 XL (rifle)**

Especificaciones	Descripción
Marca	Holmes Brothers Technologies
Modelo	70 XL
Número de ítem en catálogo	Z 91-8140-01
Cantidad de cajones	2
Dimensiones	35 $\frac{3}{4}$ pulgadas alto, 17 pulgadas ancho, 31 pulgadas largo

Fuente: Ficha técnica del equipo.

Figura 15 **Divisor 70 XL (rifle)**



Fuente: Ficha técnica del equipo.

3.4.5. Divisor 15 FXL (rifle)

El divisor 15 FXL es un modelo totalmente cerrado, elaborado en acero inoxidable, consiste en conductos de alimentación, caños y cajones de acero inoxidable 304. Contiene 24 caños los cuales poseen un ancho de 3/8 pulgada. La unidad es un modelo para la utilización sobre una mesa de trabajo.

Tabla XIX. **Especificaciones técnicas divisor 15 FXL (rifle)**

Especificaciones	Descripción
Marca	Holmes Brothers Technologies
Modelo	15 FXL
Número de ítem en catálogo	Z 91-7985-01
Cantidad de cajones	2
Dimensiones	22 pulgadas alto, 11 pulgadas ancho, 15 pulgadas largo
Peso	35 libras

Fuente: Ficha técnica del equipo.

Figura 16 **Divisor 15 FXL (rifle)**



Fuente: Ficha técnica del equipo.

3.5. Técnica cuantitativa

Para la determinación del plan de muestra bruta, tanto para la pala del cargador frontal como para cinta transportadora, se utilizó una técnica cuantitativa, dado que el resultado que se determinó fue el valor numérico de la cantidad de muestra bruta a realizar, así como la masa de las mismas, esto eligiendo un nivel de significancia.

3.5.1. Procedimiento para determinar los porcentajes que representan los diferentes tamaños de partículas y la distribución promedio de las partículas en función del tamaño de las mismas

La determinación del tamaño de partícula, el porcentaje que representan los diferentes tamaños y la distribución promedio de los mismos, es de vital importancia para poder comparar el muestreo patrón con las diferentes corridas que se realizaron. Dado a la importancia, se describe a continuación los procedimientos en los dos puntos de muestreo.

3.5.1.1. Muestreo en pala de cargador frontal

- a) Delimitar un lote para el estudio en la pila.
- b) Cuantificar la masa del lote.
- c) Determinar la cantidad de masa a muestrear con base en la tabla XX.
- d) Dividir la pala en secciones de donde se van a tomar los incrementos.
- e) Tomar un incremento para cada sección delimitada tomando en cuenta las consideraciones descritas en la sección 2.2.3.5.2: muestreo en pala de cargadores frontales.

- f) Rotular cuidadosamente y guardar en orden, para posterior análisis granulométrico.
- g) Repetir del paso d) hasta el f) hasta tener la cantidad de incrementos estipulada con anterioridad en el literal c).

Tabla XX. **Masa mínima de la muestra bruta para análisis de granulometría**

Tipo de carbón	Masa mínima requerida (kg)
Carbón como sale de la mina	No menos de 1800
Carbón tamizado con tamaño límite de 100 milímetros, (4 pulgadas)	No menos de 1800
Carbón con tamaño menor a 100 milímetros, (4 pulgadas)	No menos de 900
Carbón con tamaño menor a 50 milímetros, (2 pulgadas)	No menos de 450
Carbón con tamaño menor a 25 milímetros, (1 pulgada)	No menos de 215
Carbón con tamaño menor a 12,5 milímetros, (1/2 pulgada)	No menos de 45
Carbón con tamaño menor a 2,36 milímetros, (No.8 mesh)	No menos de 4,5

Fuente: ASTM, American Society of Testing Material, D 4749 -07. p. 5.

3.5.1.2. Muestreo en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída

- a) Delimitar un lote para estudio.
- b) Cuantificar la masa del lote.
- c) Determinar la cantidad de masa a muestrear con base en la tabla XX.
- d) Cuantificar la masa que transporta la cinta, ya sea por tiempo o por velocidad.
- e) Dividir la cinta en secciones de donde van a ser tomados los incrementos.
- f) Tomar los incrementos tomando en cuenta las consideraciones de la sección 2.2.3.3: Muestreo haciendo un corte total de un chorro de material en caída.
- g) Rotular cuidadosamente y guardar en orden, para posterior análisis granulométrico.
- h) Repetir del paso d) al f) hasta tener la cantidad de incrementos estipulada con anterioridad en el numeral c).

3.5.1.3. Preparación de la muestra para análisis granulométrico

- a) Determinar el número de veces que la muestra debe hacerse pasar por el divisor (rifle), para ajustarse a la masa mínima requerida. Esto se hace con base al total de la masa de la muestra bruta y la masa mínima requerida.
- b) Alimentar el divisor (rifle) por la parte superior teniendo su compuerta de alimentación totalmente abierta.
- c) Al abastecer, dejar caer un flujo lento y continuo al centro de la tolva alimentadora.

Tabla XXI. **Masa mínima requerida en función del tamaño del carbón para preparación de las muestras**

Tamaño del carbón	Masa mínima requerida (kg)
Carbón mayor a 25 milímetros, (1 pulgada)	Tamizar sin dividir
Carbón menor a 25 milímetros, (1 pulgada)	No menos de 56,6
Carbón menor a 12.5 milímetros, (1/2 pulgada)	No menos de 11,4
Carbón menor a 4,75 milímetros (No. 4 mesh)	No menos de 1
Carbón con tamaño menor a 2.36 milímetros, (No.8 mesh)	No menos de 0,5

Fuente: ASTM, American Society of Testing Material, D 4749 -07. p. 5.

3.5.1.4. Procedimiento de análisis granulométrico

- a) Asegurar que los tamices estén limpios antes de la prueba.
- b) Pesar una cantidad de muestra que se pueda colocar en los tamices.
- c) Colocar los tamices en el orden que se van a utilizar. En la parte superior ubicar el tamiz con la apertura de malla más grande y al final distribuir en una bandeja.
- d) Colocar la cantidad de carbón pesado en la parte superior de los tamices, asegurándose de formar una capa fina.
- e) Encender el vibrador por un periodo de tiempo determinado.
- f) Pesar el material retenido en cada tamiz y el que quedó en la bandeja, anotar las masas en la hoja de recolección de datos. La suma de estas cantidades debe tener una diferencia no mayor de 2 por ciento, ³ si la diferencia es mayor, el procedimiento se debe repetir.

³. Ref. No.1 D 4749 – 07, pág. 8

3.5.2. Procedimiento experimental para determinar el número de incrementos y la masa de los mismos

Consto en mantener una de las dos variables, ya sea la masa de los incrementos o el número de los mismos, constante mientras la otra variable fue cambiando su valor.

Tabla XXII. **Variación en la cantidad de incrementos a masa constante para muestreo en pala de cargador frontal y en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída**

Número de incrementos	Masa de incrementos (Kg)
24	3
30	3
36	3
42	3
48	3

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Variación de la masa a número de incrementos constante para muestreo en pala de cargador frontal y en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída**

Número de incrementos	Masa de incrementos (Kg)
35	1
35	2
35	3
35	4
35	5

Fuente: elaboración propia.

3.6. Recolección de datos

Fue necesario contar con una hoja de recolección de datos para anotar ordenadamente los datos de los muestreos y de este modo llevar un proceso sistemático. Para cada punto de muestreo se realizó una hoja específica.

Figura 17. Muestreo en pala de cargador frontal

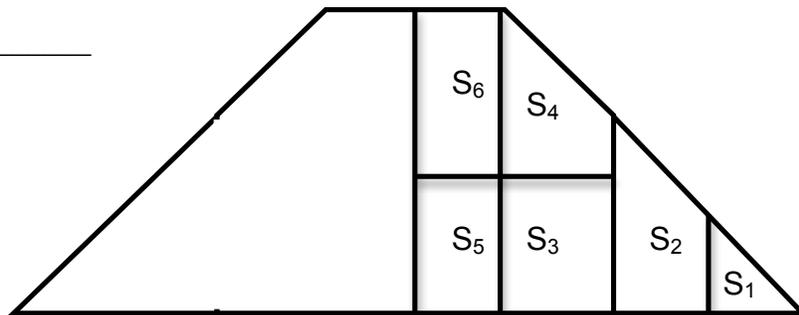
Fecha: ____ / ____ / ____ Hora: _____

Describir el plan de muestreo:

Masa del incremento: _____ Número de incrementos _____

Identificar el sector donde se está recogiendo el material

Sector: _____



Confirmar la toma de incremento en pala de cargador frontal

α	A_1	α
β	B_1	β

Observaciones:

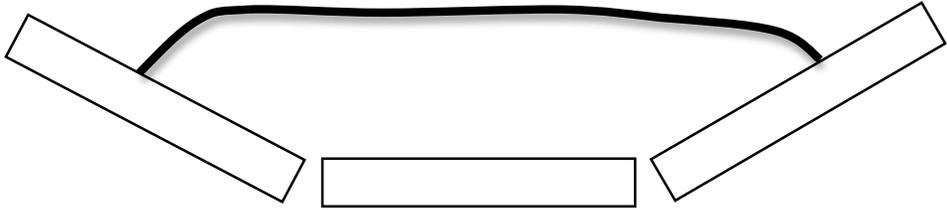
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Muestreo en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída**

Fecha: ____ / ____ / ____ Hora: _____

Describir el plan de muestreo:

Masa del incremento: _____ Número de incrementos _____



Observaciones:

Fuente: elaboración propia.

3.7. Procesamiento de la información

Para el procesamiento ordenado de la información se hicieron diversas tablas con las cuales se puede manipular la información de una manera más sencilla.

Figura 19. **Tabulación de datos de análisis granulométrico**

Fecha: ____ / ____ / ____	Hora: _____
De dónde proviene el incremento: _____	
Código del incremento: _____	
Masa inicial: _____	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Tabulación de las masas en los diferentes tamices**

Tamiz	Masa retenido (g)
N ₁	<i>m</i> ₁
N ₂	<i>m</i> ₂
N ₃	<i>m</i> ₃
N ₄	<i>m</i> ₄
N ₅	<i>m</i> ₅
N ₆	<i>m</i> ₆
bandeja	<i>m</i> ₇
Masa total	<i>m</i> _T
% error	

Fuente: elaboración propia.

3.7.1. Porcentaje que representan los diferentes tamaños de partícula

La tabla XXV fue utilizada en el programa Excel con cada una de las fórmulas en las celdas indicadas.

Tabla XXV. Cálculo del porcentaje retenido por el tamiz

Tamiz	Masa Retenido (g)	Porcentaje Retenido (%)
N ₁	m_1	$\frac{m_1}{m_T} * 100 = R_1$
N ₂	m_2	$\frac{m_2}{m_T} * 100 = R_2$
N ₃	m_3	$\frac{m_3}{m_T} * 100 = R_3$
N ₄	m_4	$\frac{m_4}{m_T} * 100 = R_4$
N ₅	m_5	$\frac{m_5}{m_T} * 100 = R_5$
N ₆	m_6	$\frac{m_6}{m_T} * 100 = R_6$
bandeja	m_7	$\frac{m_7}{m_T} * 100 = R_7$
	$\Sigma = m_r$	$\Sigma = 100\%$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

$N_1, N_2 \dots N_6$ = número de tamiz utilizado, respectivamente

$m_1, m_2 \dots m_6$ = masa retenida en el respectivo tamiz

m_T = masa total de la muestra

$R_1, R_2 \dots R_6$ = porcentaje retenido en el respectivo tamiz

Los subíndices con el numeral 7 se refieren al material de la bandeja

3.7.2. Distribución promedio de las partículas en función del tamaño de partícula

La distribución promedio de las partículas en función del tamaño de partícula, se tabuló en dos columnas, la primera indicando el tamaño de la partícula y la segunda indicando su frecuencia. Esta distribución fue representada por medio de una curva granulométrica. Esta representación se lleva a cabo para cada sector delimitado y de esta forma se determinó la distribución. Para poder tener la distribución promedio fue necesario sumar los porcentajes de cada sector en la pila o cinta y luego hacer un promedio.

Tabla XXVI. **Muestra de tabla de distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula**

Tamaño (pulgada)	Frecuencia (%)
T_1	F_1
T_2	F_2
T_3	F_3
T_4	F_4
T_5	F_5

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

Fue necesario realizar un análisis estadístico dado que lo que se determinó fue el grado de acercamiento de las diferentes corridas con el patrón, por medio de una análisis estadístico.

3.8.1. Prueba de bondad de ajuste ji cuadrada

El análisis estadístico se llevó a cabo por medio de la prueba de bondad de ajuste ji cuadrada. El propósito de la prueba fue comparar una distribución de frecuencia observada con una distribución de frecuencia de referencia siempre que ambas frecuencias se refieran a la misma variable medida, y establecer si existían diferencias estadísticamente significativas entre ambas distribuciones.

Al llevar a cabo la prueba fue necesario establecer las siguientes hipótesis estadísticas

$$H_0: F_o = F_e$$

$$H_a: F_o \neq F_e$$

Donde:

H_0 : hipótesis nula

H_a : hipótesis alternativa

F_o : distribución de frecuencia observada

F_e : distribución de frecuencia de referencia

Fue necesario realizar el cálculo de la medida de resumen denominada ji cuadrada la cual se simboliza X^2 . El valor de ji cuadrada fue comparado con un

valor crítico de dicha medida, el cual se encuentra en una tabla llamada valores críticos de ji cuadrada (anexo 1).

El rechazo de la hipótesis nula (H_0) se da cuando el valor determinado de ji cuadrada es mayor que el valor crítico de ji cuadrada contenida en la tabla de valores críticos de dicha medida.

En el caso contrario que el valor de ji cuadrada calculada sea menor o igual al valor de ji cuadrada crítica, la hipótesis nula no es rechazada. Se establece entonces que ambas distribuciones se ajustan.

3.8.1.1. Determinación de ji cuadrada

En la determinación de ji cuadrada se utilizó la tabla XXVII, en la cual se encuentran los valores que emplearon en la ecuación 2, con la cual se determinó el valor de ji cuadrada.

$$x^2 = \sum \frac{(o - e)^2}{e}$$

Ecuación 2

Donde:

X^2 : ji cuadrada

o: cada frecuencia respectiva observada

e: cada frecuencia respectiva de referencia

La tabla XXVII fue utilizada en el programa excel, con cada una de las fórmulas en las celdas indicadas.

Tabla XXVII. Cálculos para determinar ji cuadrada

	T₁	T₂	T₃	T₄
o	F_{o1}	F_{o2}	F_{o3}	F_{o4}
e	F_{e1}	F_{e2}	F_{e3}	F_{e4}
(o - e)	$(F_{o1} - F_{e1})$	$(F_{o2} - F_{e2})$	$(F_{o3} - F_{e3})$	$(F_{o4} - F_{e4})$
(o - e)²	$(F_{o1} - F_{e1})^2$	$(F_{o2} - F_{e2})^2$	$(F_{o3} - F_{e3})^2$	$(F_{o4} - F_{e4})^2$
$\frac{(o - e)^2}{e}$	$\frac{(F_{o1} - F_{e1})^2}{F_{e1}}$	$\frac{(F_{o2} - F_{e2})^2}{F_{e2}}$	$\frac{(F_{o3} - F_{e3})^2}{F_{e3}}$	$\frac{(F_{o4} - F_{e4})^2}{F_{e4}}$

$$x^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(o_i - e_i)^2}{e_i}$$

Fuente: elaboración propia.

3.8.1.2. Determinación de ji cuadrada crítica

La determinación de ji cuadrada crítico se llevo a cabo calculando los grados de libertad y después el nivel de significancia, en la intersección de los dos valores se encontró el valor de ji cuadrada crítico, el procedimiento se explica en las siguientes viñetas.

- Determinar los grados de libertad por medio de la siguiente fórmula

$$GL = K - 1$$

Ecuación 3

Donde:

Gl: grados de libertad

K: cantidad de parámetros estimados en la distribución

- Determinar un nivel de significancia α .
- Trazar una recta horizontal desde los grados de libertad y una vertical desde el nivel de significancia y en la intersección se encuentra el valor crítico de ji cuadrada.

Los grados de libertad para el caso específico de la tabla XXVI serian $Gl=5-1$.

4. RESULTADOS

4.1. Muestreo estadístico óptimo en pala de cargador frontal y en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída

A continuación se presenta los resultados del muestreo estadístico óptimo en ambos puntos de recolección de muestras.

Tabla XXVIII. **Muestreo estadístico óptimo en pala de cargador frontal**

No. de incrementos	Masa de los incrementos (Kg)	Significancia (%)
36	5	90

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de apéndice 31.

Tabla XXIX. **Muestreo estadístico óptimo en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída**

No. de incrementos	Masa de los incrementos (Kg)	Significancia (%)
36	4	93

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de apéndice 32.

4.2. Plan de toma de muestra bruta

A continuación se presenta los resultados del plan de toma de muestras, el cual incluye la cantidad de incrementos a tomar, la masa del incremento y la frecuencia de la toma del muestreo en minutos.

Tabla XXX. **Plan de toma de muestra bruta conformado por dos puntos de toma de muestras y sus especificaciones respectivas**

Punto de toma de incremento	Cantidad de incrementos a tomar	Masa de los incrementos (Kg)	Frecuencia de toma de incrementos (min)	Significancia (%)	Indicación
Pala cargador frontal	36	5	15	90	Variar la posición de la toma de los incrementos dentro de los 24 puntos de toma de incrementos mostrados en figura 17.
Cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída	36	4	15	93	Realizar la toma de los incrementos de la manera adecuada indicada en figura 18.

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de apéndice 31 y 32.

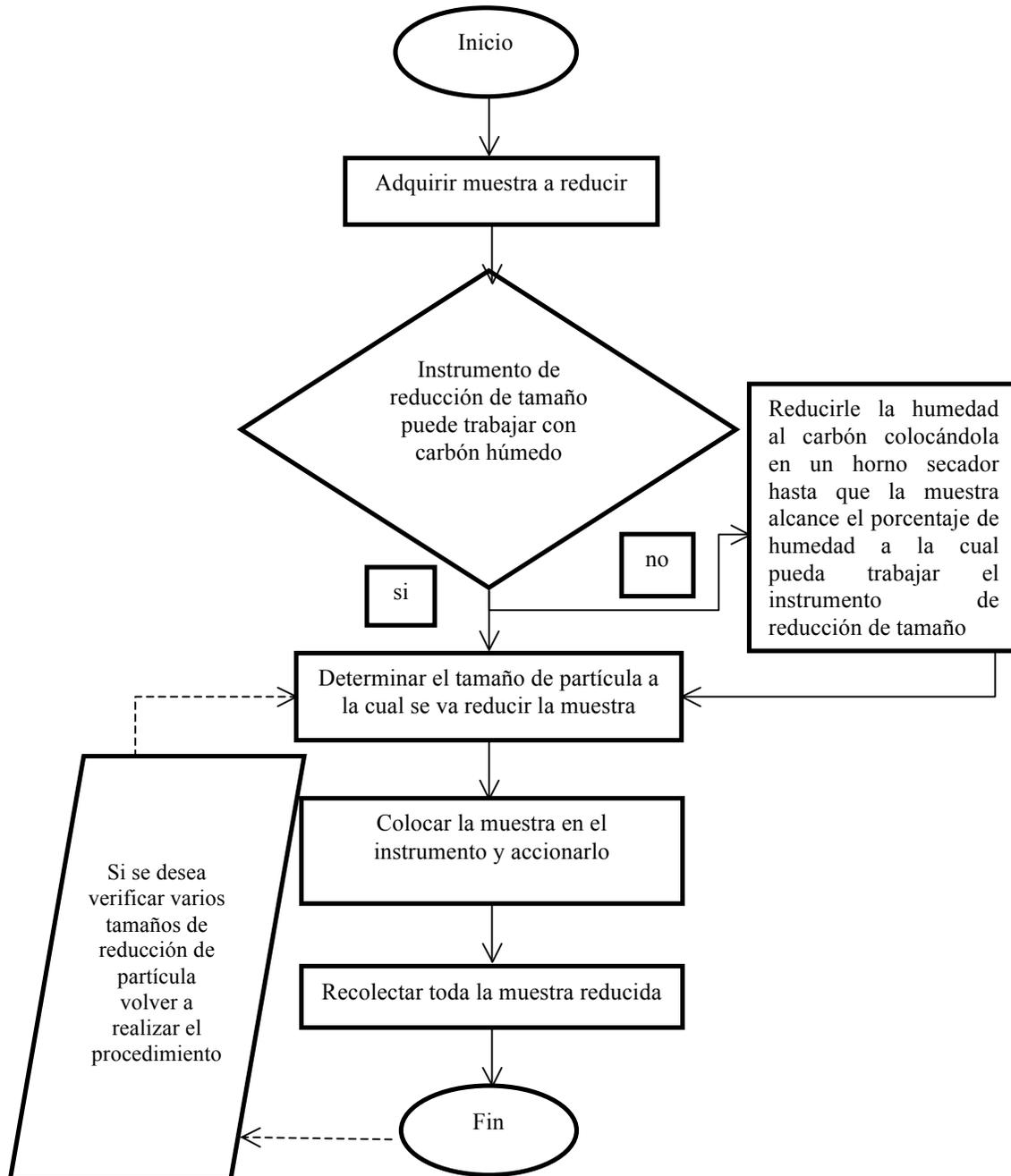
4.3. Procedimiento óptimo de preparación de muestras para análisis granulométrico

El análisis granulométrico se utiliza para dos diferentes procesos. El primero es para poder verificar la calibración de un instrumento de reducción de tamaño de partícula como lo puede ser una trituradora o pulverizadora. El segundo es para poder determinar la frecuencia de tamaño de partícula de alguna muestra en específico, en ambos casos el procedimiento de preparación de muestra es diferente.

4.3.1. Procedimiento de preparación de muestras para verificación de calibración de un instrumento de reducción de tamaño de partícula por medio de un análisis granulométrico

- a) Adquirir muestra a reducir, no es necesario tener una cantidad de muestra en específico, basta con tener lo suficiente para poder realizar 3 corridas como mínimo.
- b) Si el instrumento de reducción de tamaño tiene una limitante al trabajar con cierto porcentaje de humedad en el carbón y, si el carbón sobrepasa dicha especificación, entonces reducirle la humedad a la muestra colocándola en un horno secador.
- c) Determinar el tamaño de partícula a la cual se va a reducir la muestra.
- d) Colocar la muestra en el instrumento de reducción de tamaño de partícula y accionar el instrumento.
- e) Recolectar toda la muestra reducida.
- f) Si se desea verificar varios tamaños de reducción de partícula volver a realizar el procedimiento desde la literal a) hasta la e) y en la c) escoger el tamaño de partícula de interés.

Figura 20. Diagrama de flujo de preparación de muestras para verificación de calibración de un instrumento de reducción de tamaño de partícula por medio de un análisis granulométrico

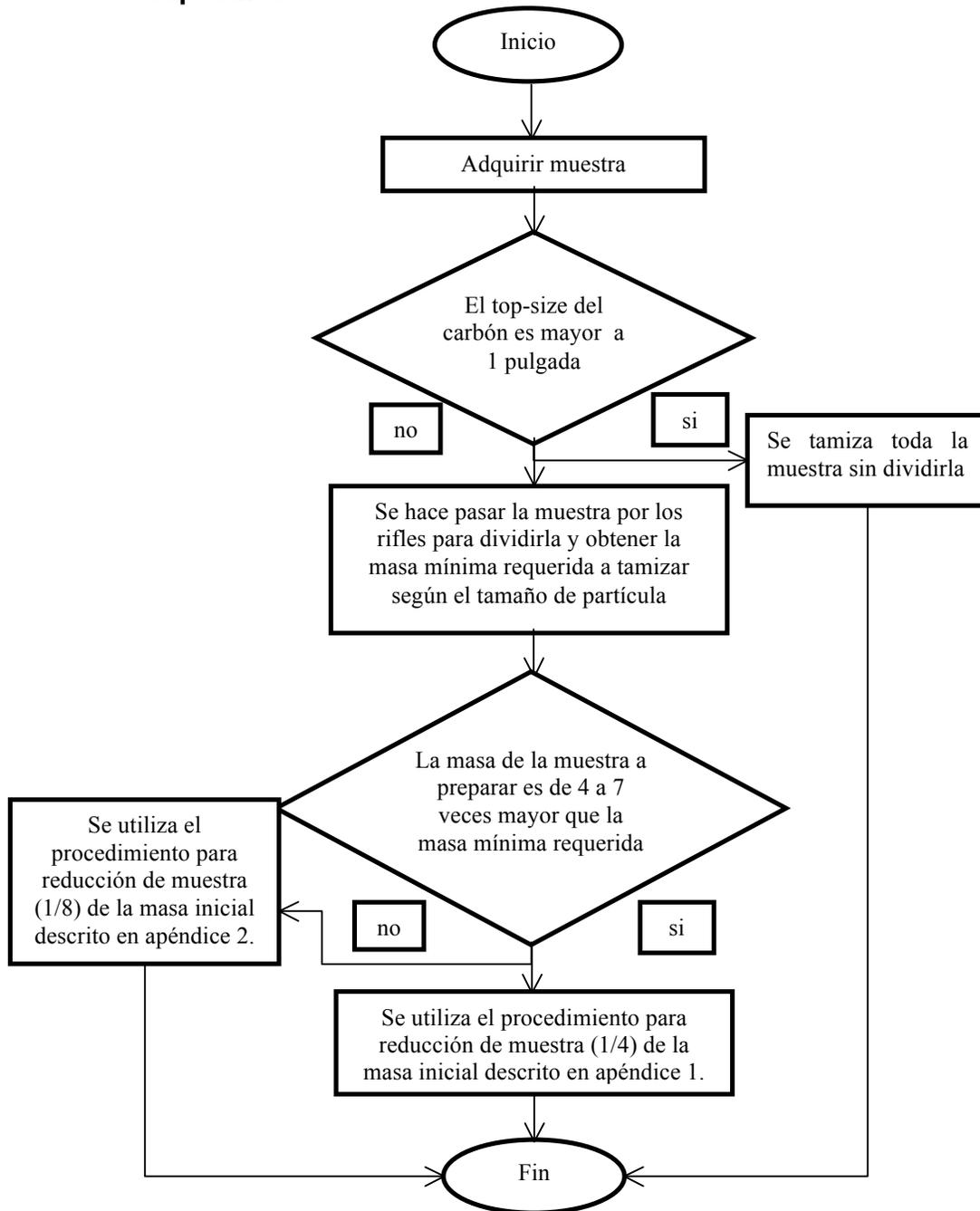


Fuente: elaboración propia.

4.3.2. Procedimiento de preparación de muestras para determinar la frecuencia de tamaño de partícula de alguna muestra en específico

- a) Adquirir la muestra que se va a preparar para determinar la frecuencia de tamaño de partícula.
- b) Saber el top-size del carbón. Es necesario tener un conocimiento previo del top-size del carbón que se va a preparar para el análisis de granulometría, debido a que existe una masa mínima requerida que está en función del tamaño de partícula. Esto está indicado en la tabla XXI.
- c) Si el top-size es mayor a 1 pulgada, entonces se tamiza toda la muestra sin dividirla. Si el top-size es menor a 1 pulgada, entonces se hace pasar la muestra por los rifles para dividirla y obtener la masa mínima requerida a tamizar según el tamaño de partícula.
- d) Si la masa de la muestra a preparar para determinar la frecuencia de tamaño de partícula es de 4 a 7 veces mayor que la masa mínima requerida, se utiliza el procedimiento para reducción de muestra (1/4) de la masa inicial descrito en el apéndice 1. Si la masa de la muestra a preparar para determinar la frecuencia de tamaño de partícula es de 8 veces en adelante mayor que la masa mínima requerida, se utiliza el procedimiento para reducción de muestra (1/8) de la masa inicial descrito en el apéndice 2.

Figura 21. Diagrama de flujo de preparación de muestras para determinar la frecuencia de tamaño de partícula de alguna muestra en específico



Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El muestreo estadístico óptimo se determinó para dos puntos de muestreo, en pala de cargador frontal y en cinta transportadora; haciendo un corte total de un chorro de material en caída. Para la determinación del muestreo estadístico óptimo se hicieron corridas haciendo variar la masa y manteniendo el número de incrementos constante y viceversa. Luego se determinó la distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula para cada corrida y se comparó con la distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula del patrón, previamente determinado para ambos puntos de muestreo.

Para el muestreo estadístico óptimo en pala de cargador frontal se observó que al ir variando el número de incrementos desde su valor menor que fue 24 hasta su valor mayor que fue 48, la distribución de frecuencia se acercaba significativamente hasta llegar a los 36 incrementos. A partir de los 36 incrementos su acercamiento al patrón fue mínimo. El comportamiento observado al variar el número de incrementos es asintótico, al ir aumentando el número de incrementos, esto según apéndice 10.

Al variar la masa de los incrementos desde 1 kilogramo hasta 5 kilogramos se observó que las distribuciones de frecuencia se acercaban a un ritmo constante, es decir, que la distribución de frecuencia con incrementos de 1 kilogramo hasta 5 kilogramos tuvo la misma tasa de acercamiento a la curva de distribución de frecuencias del patrón. El comportamiento observado de las curvas de distribución de frecuencias al ir aumentando la masa de los incrementos tienen un comportamiento lineal, esto según apéndice 11.

Para el muestreo estadístico óptimo en cinta transportadora, haciendo un corte total de un chorro de material en caída, las distribuciones de frecuencia al variar el número de incrementos y la masa de los incrementos tuvieron el mismo comportamiento que el muestreo estadístico óptimo en pala de cargador frontal, esto según apéndice 14 y 15.

Dado los comportamientos observados al ir variando la cantidad de incrementos y la masa de los mismos, se determinó que la variable que más influye, a que la distribución de frecuencia se acerque más al patrón es la masa de los incrementos.

El punto de muestreo donde esta variable tiene más importancia es en el muestreo en pala de cargador frontal. El motivo es que la distribución de frecuencia según apéndice 4 y 5, muestra que el carbón proveniente de la pila está constituido en un 8,81 por ciento por carbón de 1,00 pulgada, 24,37 por ciento por carbón de 1,25 pulgadas, 27,66 por ciento por carbón de 1,5 pulgadas, 17 por ciento por carbón de 2 pulgadas, 9 por ciento por carbón de 2,5 pulgadas. y 7,82 por ciento por carbón de 3.00 pulgadas.

Esto muestra que la distribución de frecuencia en función al tamaño de partícula no es homogénea. Al existir carbones de dimensiones grandes, por ejemplo, de 2 pulgadas. es necesario tomar un incremento con mayor masa, dado que las dimensiones de la pala de muestreo esta en función del top-size del carbón.

Al tener un porcentaje alto de carbón superior a 2 pulgadas es necesario que la masa del incremento sea de 5 kilogramos para permitir que los carbones de dichas dimensiones tengan la posibilidad de formar parte de la muestra y de

este modo hacer que la distribución de frecuencia se acerque en mayor medida a la del patrón.

En el muestreo en cinta transportadora, haciendo un corte total de un chorro de material en caída la masa del incremento es menos determinante que en el muestreo en pala de cargador frontal. Este comportamiento es debido a que el carbón antes de ser muestreado en la cinta transportadora pasó por una trituradora, la cual reduce el carbón en su gran mayoría a un tamaño de 1 pulgada, esto implica que la trituradora homogeniza el tamaño del carbón haciendo que la distribución de frecuencia tenga un mayor porcentaje en el tamaño de 1 pulgada, como se muestra en apéndice 5.

El diseño y elaboración del plan de toma de muestra bruta se hizo con base al muestreo estadístico óptimo en los dos puntos de muestreo, como también, el tiempo en que está en funcionamiento la cinta transportadora para de este modo determinar la frecuencia en minutos en que se van a tomar los incrementos. Se determinó que se van a tomar los incrementos cada 15 minutos para ambos puntos de muestreo, siempre siguiendo las indicaciones específicas para cada punto de muestreo. Lo anterior indicado está expuesto en la tabla XXX.

Para la realización del procedimiento óptimo de preparación de muestras para análisis granulométrico, se hicieron dos procedimientos con su respectivo diagrama de flujo, dado que el análisis granulométrico se utiliza en dos diferentes procesos. El primero es para poder verificar la calibración de un instrumentos de reducción de tamaño de partícula y, el segundo es para poder determinar la frecuencia de tamaño de partícula de alguna muestra en específico.

Fue necesario crear dos procedimientos diferentes debido que en el primer proceso en que se utiliza el análisis granulométrico, es necesario que la muestra a preparar sea reducida por el instrumento de reducción de tamaño a un tamaño específico, dado que posteriormente en el análisis granulométrico se va a determinar si el instrumento está reduciendo la partícula al tamaño que se supone que lo hace.

En el segundo proceso que se utiliza el análisis granulométrico, la muestra a preparar no debe de ser reducida de tamaño de partícula, debido a que el objeto del análisis es determinar la distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula.

La tabla XXI especifica la masa mínima requerida para la preparación de la muestra en función del tamaño del carbón. En ocasiones la muestra bruta a preparar es demasiado grande para poder ser tamizada toda por completo y con base a la masa mínima requerida en función al tamaño de partícula se realizaron dos diagramas de flujo mediante los cuales se realiza una reducción de la masa a $\frac{1}{4}$ de la masa inicial y, a $\frac{1}{8}$ de la masa inicial, los diagramas se presentan en los apéndices 1 y 2 respectivamente.

El motivo de reducir la muestra es tener una cantidad de la muestra que sea representativa de la muestra bruta y esto se logra con el procedimiento de reducción de la masa de la muestra. El procedimiento, también contribuye a disminuir el sesgo dado que se utilizan los rifles, los cuales son lo que sin intervención humana dividen la muestra en dos partes iguales.

Para saber qué diagrama de flujo utilizar, es necesario saber la masa de la muestra a preparar, si la masa de la muestra a preparar es de 4 a 7 veces mayor que la masa mínima requerida para un determinado tamaño de partícula,

entonces se debe de usar el diagrama de flujo para reducción de muestra a $\frac{1}{4}$ de la masa inicial descrito en el apéndice 1. Si la masa es de 8 veces en adelante mayor que la masa mínima requerida para un determinado tamaño de partícula, se utiliza el diagrama de flujo para reducción de muestra $\frac{1}{8}$ de la masa inicial descrito en el apéndice 2.

CONCLUSIONES

1. Para el muestreo estadístico óptimo en pala de cargador frontal, se determinó que es necesario realizar 36 incrementos de 5 kilogramos cada uno para poder asegurar con un nivel de significancia de 90 por ciento que el muestreo se ajuste al patrón.
2. Para el muestreo estadístico óptimo en cinta transportadora, haciendo un corte total de un chorro de material en caída, se determinó que es necesario realizar 36 incrementos de 4 kilogramos cada uno, para poder asegurar con un nivel de significancia del 93 por ciento que el muestreo se ajuste al patrón.
3. La masa de los incrementos es la variable que más influye para que la distribución de frecuencia en función al tamaño de partícula se ajuste significativamente a la distribución de frecuencia en función al tamaño de partícula del patrón.
4. El diseño y elaboración del plan de toma de muestras brutas se realizó con base al muestreo estadístico óptimo en los dos puntos de toma de muestras, así también, del tiempo de operación de la cinta transportadora.

RECOMENDACIONES

1. Es necesario respetar las masas mínimas indicadas en la tabla XX, masa mínima de la muestra bruta para análisis de granulometría y, XXI masa mínima de la muestra bruta para análisis de granulometría . Dado que las masas indicadas están en función al tamaño del carbón y esto asegura que los carbones de tamaño indicado se encuentren presentes en la muestra a preparar o examinar.
2. Es de vital importancia llevar un orden en cuanto a la toma de incrementos para la realización de la distribución de frecuencia del patrón. Dado que el patrón va a ser el valor a comparar las corridas realizadas y en función a su acercamiento al patrón se van a aceptar o no los resultados de las corridas.
3. En la manera de lo posible tratar de no utilizar carbón húmedo debido a que suele atorarse en los rifles, cuando se llevan a cabo los procedimientos de preparación de muestras.
4. Al utilizar el tamizador es necesario limpiar o recolectar muy bien los restos de carbón que quedan en los tamices, debido a que los mismos pueden hacer falta para tener un dato más preciso o interferir en los resultados de pruebas próximas.

5. El valor de la significancia para realizar la confirmación estadística a través de la prueba de bondad de ajuste, se debe de determinar por las partes interesadas. Si no hubiera consenso, entonces es recomendable tomar un valor de referencia para poder realizar los primeros cálculos y con base a estos, poder llegar a tomar un valor fijo para la significancia.
6. Es importante que al haber designado el nivel de significancia para realizar el tratamiento estadístico, se tomen valores de significancia menores y mayores al valor designado, esto ayudará a visualizar si con un valor menor de la variable de control se puede alcanzar el nivel de significancia deseado.
7. En si, el tratamiento estadístico de la confirmación estadística a través de la prueba de bondad ji cuadrada es sencillo, pero no por eso deja de tener relevancia, dado que el resultado del mismo indica el acercamiento de un muestreo a un patrón con un nivel de significancia dado.

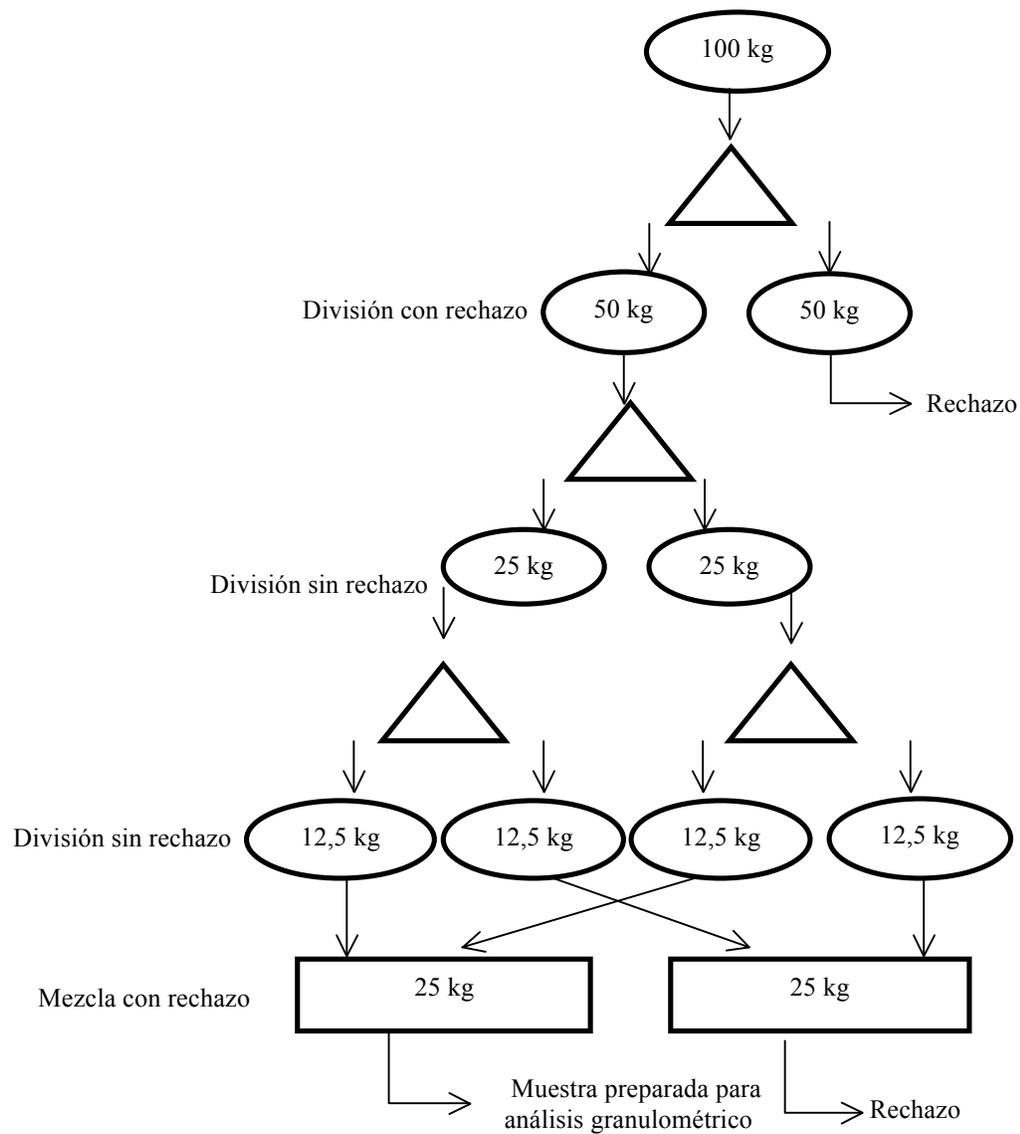
BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM, *American Society of Testing Material*, normas utilizadas, D 2013 – 07, D 2234 / D 2234 M – 09, D 4749 – 07, D 6609 – 08, D 6883 – 04.
2. CASTAÑEDA, Sergio. *Evaluación admixturas minerales para concreto de acuerdo a la Norma Coguanor NGO 41 044 87. Muestreo y métodos de análisis de cenizas volantes de carbón y puzolanas naturales empleadas como aditivo mineral al hormigón (concreto) de cemento portland*. Guatemala, 2000. 180 p.
3. CHATTOPADHYAY. P. *Boiler operations questions and answers*. Estados Unidos: McGraw-Hill, 1995. 627 p. ISBN 0-07-460296-9.
4. CIFUENTES, Jorge. *Tecnología del carbón mineral con énfasis en procesos metalúrgicos, generación de energía mecánica y eléctrica y sus aplicaciones en Guatemala*. Guatemala, 1991. 210 p.
5. Comisión Guatemalteco de Normas, Guatemala: COGUANOR NGO 41 044 87, 1987.
6. SGS, *Curso básico de muestreo de carbón*, Colombia, SGS Colombia: Mineral Services. 2011. 52 p.

7. SPEIGHT, James G. *Handbook of coal analysis*. A series of monographs on analytical chemistry and its applications. Estados Unidos: Wiley-Interscience, 2005. 238 p. ISBN 0-471-52273-2.
8. PERRY, Robert H; GREEN, Don W. *Manual del ingeniero químico*. España: McGraw-Hill, 2001. 3144 p. ISBN 84-481-3345-5.
9. WALPOLE, Donald E. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. México: McGraw-Hill, 1992. 823 p. ISBN 0-02-424210-1.

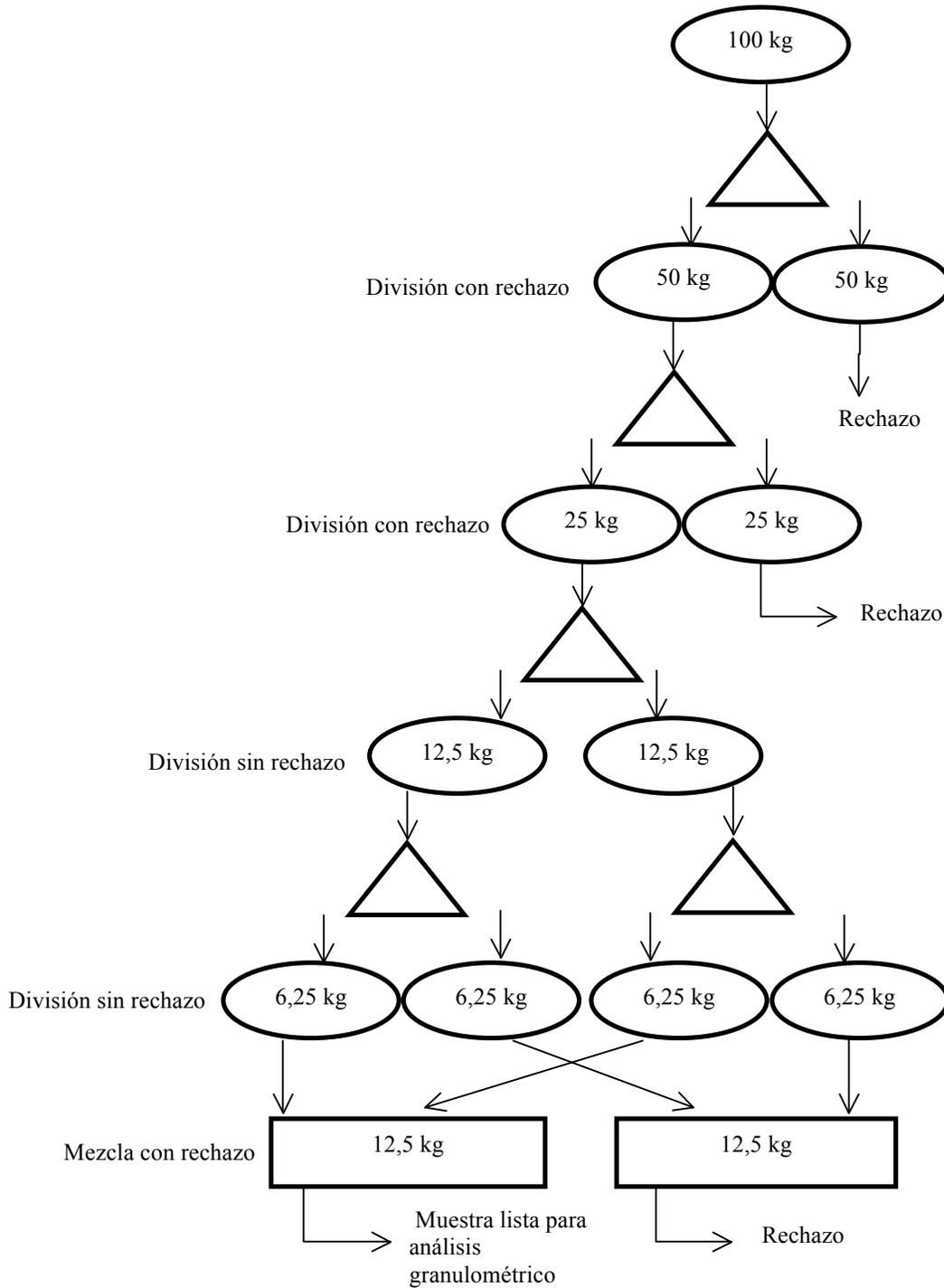
APÉNDICES

Apéndice 1. **Diagrama de flujo para reducción de muestra a $\frac{1}{4}$ de la masa inicial**



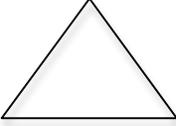
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de flujo para reducción de muestra a $\frac{1}{8}$ de masa inicial



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Simbología para diagrama de reducción de muestra**

Nombre	Símbolo	Significado
Muestra		Muestra a dividir
Divisor (riflo)		Unidad que divide en dos partes iguales la muestra
Mezclador		Unidad donde se mezclan las muestras

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula para el patrón en pala de cargador frontal

Tamiz Tamaño		Porcentaje en función del tamaño (%)
(mm)	(pulg)	
75,00	3,00	7,82
63,00	2,50	9,00
50,00	2,00	17,00
37,50	1,50	27,66
31,50	1,25	24,37
25,00	1,00	8,81
Bandeja		5,34

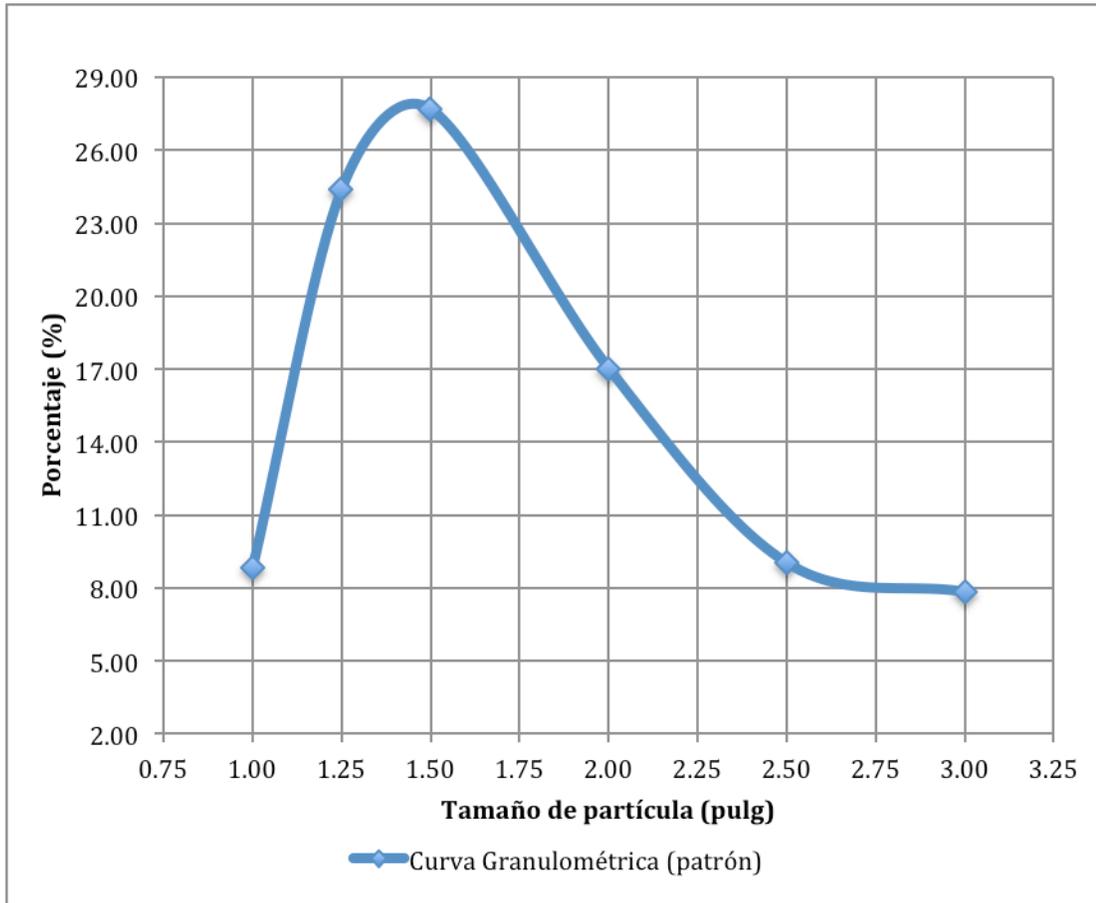
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la sección 3.5.1.1. y de la tabla XX.

Apéndice 5. Distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula para el patrón en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída

Tamiz Tamaño		Porcentaje en función del tamaño (%)
(mm)	(pulg)	
31,50	1,25	7,33
25,00	1,00	69,78
19,00	0,75	11,49
12,50	0,50	4,21
9,50	0,37	3,87
6,30	0,25	2,94
Bandeja		0,38

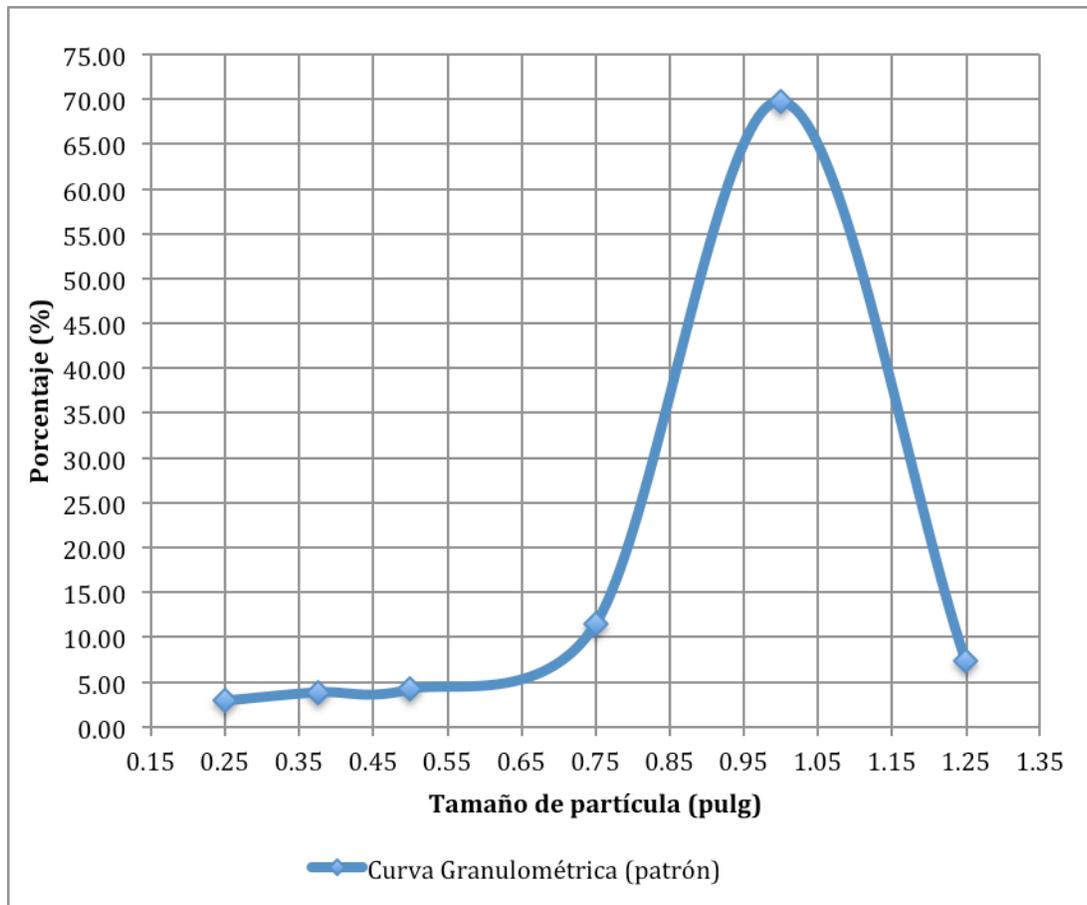
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la sección 3.5.1.2. y tabla XX.

Apéndice 6. Distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula para el patrón en pala de cargador frontal



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del apéndice 4.

Apéndice 7. **Distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula para el patrón en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del apéndice 5.

Apéndice 8. Distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula manteniendo la masa de los incrementos constante en 3 kg y variando la cantidad de los incrementos en pala de cargador frontal

Tamiz		Porcentaje en función del tamaño (%)					
Tamaño							
(mm)	(pulg)	Masa constante 3 kg					
		No. de incrementos					
		Patrón	24	30	36	42	48
75,00	3,00	7,82	3,89	5,43	6,11	6,43	6,53
63,00	2,50	9,00	4,91	6,21	6,86	7,25	7,30
50,00	2,00	17,00	12,57	14,09	15,18	15,67	15,83
37,50	1,50	27,66	23,32	24,78	25,72	26,11	26,18
31,50	1,25	24,37	18,90	21,50	22,56	22,93	23,35
25,00	1,00	8,81	4,64	6,12	6,87	7,22	7,39

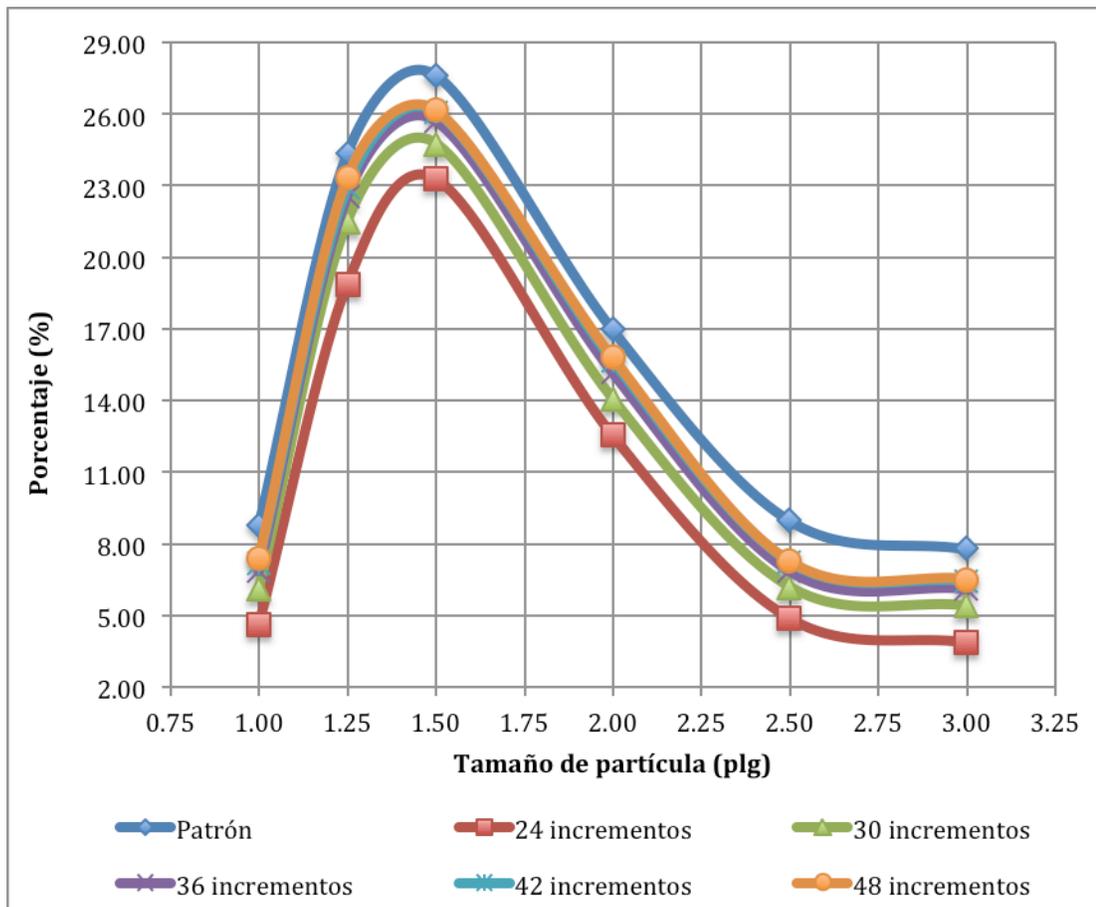
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la tabla XXII.

Apéndice 9. Distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula manteniendo el número de incrementos constante en 35 y variando la masa de los incrementos en pala de cargador frontal

Tamiz		Porcentaje en función del tamaño (%)					
Tamaño							
(mm)	(pulg)	Número de incrementos constante 35					
		Patrón	1 kg	2 kg	3 kg	4 kg	5 kg
75,00	3,00	7,82	4,13	4,78	5,78	6,08	6,86
63,00	2,50	9,00	5,44	6,11	7,07	7,43	8,26
50,00	2,00	17,00	13,54	14,32	15,35	15,79	16,38
37,50	1,50	27,66	23,95	24,69	25,71	26,14	26,72
31,50	1,25	24,37	20,45	21,14	21,93	22,38	23,06
25,00	1,00	8,81	5,18	5,91	6,74	7,15	7,92

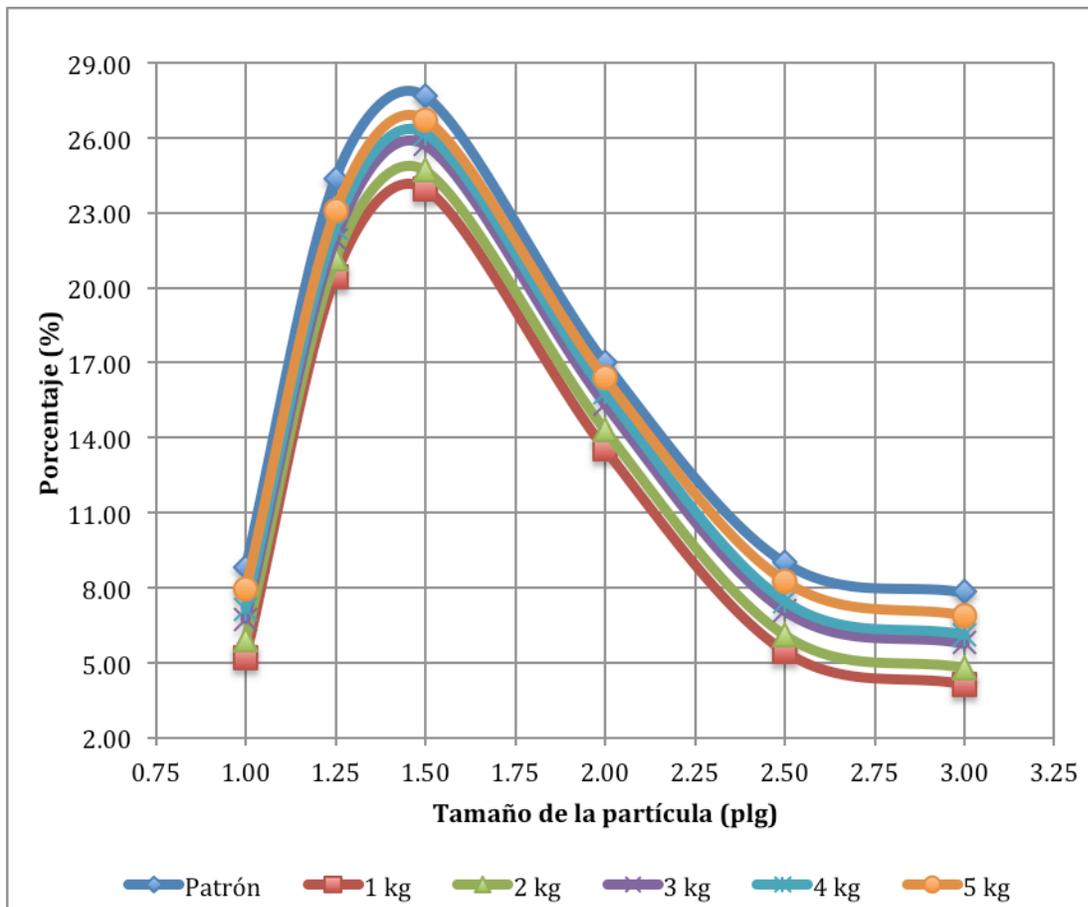
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la tabla XXIII.

Apéndice 10. **Distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula manteniendo la masa de los incrementos constante en 3 kg y variando la cantidad de los incrementos en pala de cargador frontal**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del apéndice 8.

Apéndice 11. **Distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula manteniendo el número de incrementos constante en 35 y variando la masa de los incrementos en pala de cargador frontal**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del apéndice 9.

Apéndice 12. **Distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula manteniendo la masa de los incrementos constante en 3 kg y variando la cantidad de los incrementos en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída**

Tamiz		Porcentaje en función del tamaño (%)					
Tamaño							
(mm)	(pulg)	Masa constante 3 kg					
		No. de incrementos					
		Patrón	24	30	36	42	48
31,50	1,25	7,33	4,92	5,36	5,64	5,86	6,05
25,00	1,00	69,78	58,73	63,34	66,88	67,23	67,83
19,00	0,75	11,49	8,86	9,81	9,87	10,11	10,34
12,50	0,50	4,21	2,75	3,27	3,76	3,87	3,91
9,50	0,37	3,87	2,65	2,94	3,13	3,26	3,39
6,30	0,25	2,94	1,42	1,68	2,15	2,31	2,43

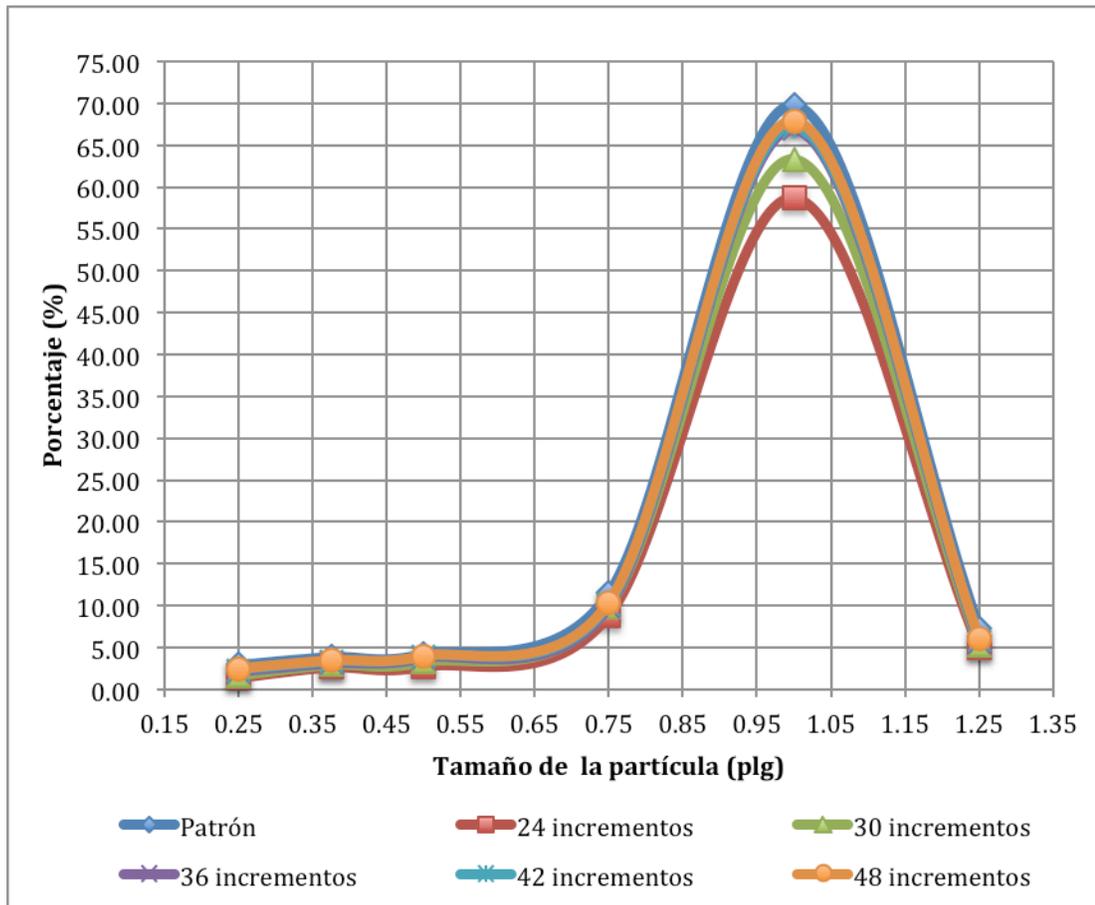
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la tabla XXII.

Apéndice 13. **Distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula manteniendo el número de incrementos constante en 35 y variando la masa de los incrementos en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída**

Tamiz		Porcentaje en función del tamaño (%)					
Tamaño							
(mm)	(pulg)	Número de incrementos constante 35					
		Patrón	1 kg	2 kg	3 kg	4 kg	5 kg
31,50	1,25	7,33	5,33	5,82	6,07	6,48	6,87
25,00	1,00	69,78	59,84	61,22	63,88	66,89	67,74
19,00	0,75	11,49	9,32	9,54	10,01	10,53	10,77
12,50	0,50	4,21	3,14	3,33	3,72	3,90	4,03
9,50	0,37	3,87	2,61	3,08	3,19	3,41	3,54
6,30	0,25	2,94	1,39	1,41	1,69	1,81	2,11

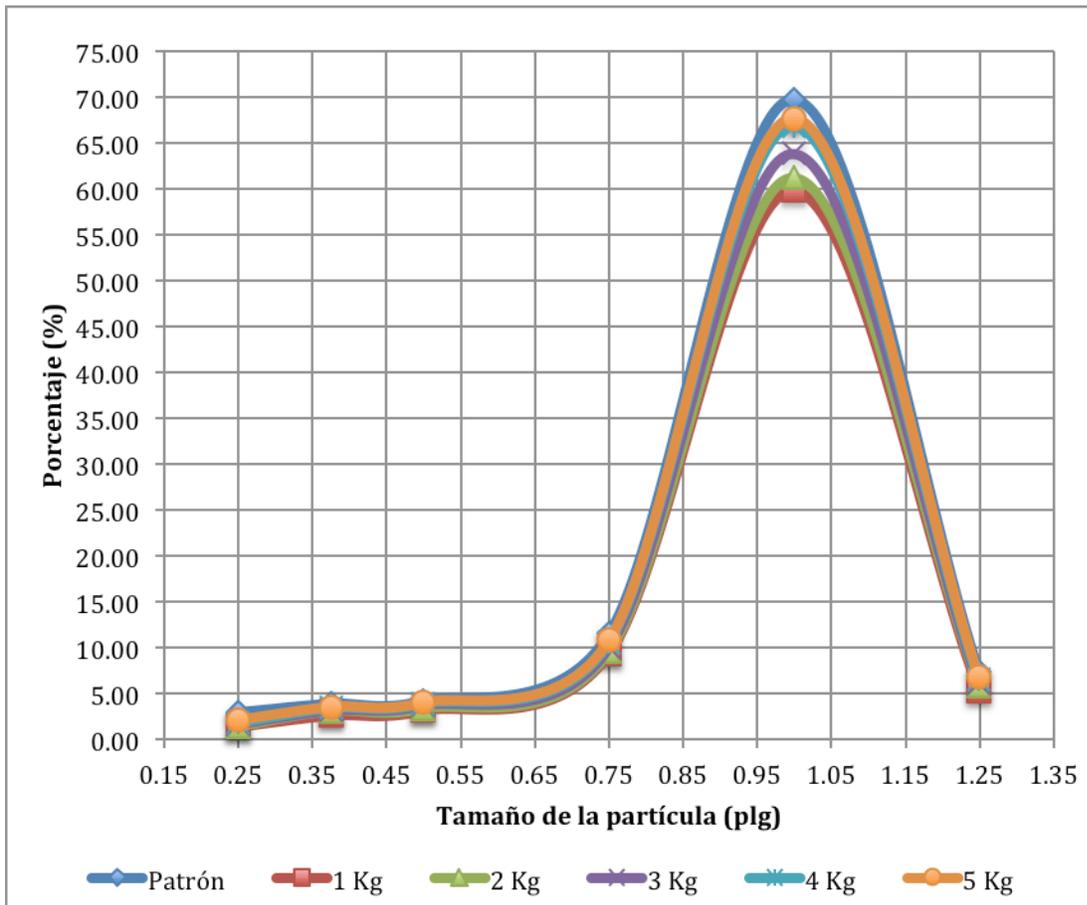
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la tabla XXIII.

Apéndice 14. **Distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula manteniendo la masa de los incrementos constante en 3 kg y variando la cantidad de los incrementos en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída.**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del apéndice 12.

Apéndice 15. **Distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula manteniendo el número de incrementos constante en 35 y variando la masa de los incrementos en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del apéndice 13.

Apéndice 16. **Determinación de ji cuadrada para distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula manteniendo la masa de los incrementos constante en 3 kg y variando la cantidad de los incrementos en pala de cargador frontal**

No. de incrementos	T1	T2	T3	T4	T5	T6
24	3,89	4,91	12,57	23,32	18,90	4,64
	7,82	9,00	17,00	27,66	24,37	8,81
	-3,93	-4,09	-4,43	-4,34	-5,47	-4,17
	15,44	16,73	19,62	18,84	29,92	17,39
	1,98	1,86	1,15	0,68	1,23	1,97
30	5,43	6,21	14,09	24,78	21,50	6,12
	7,82	9,00	17,00	27,66	24,37	8,81
	-2,39	-2,79	-2,91	-2,88	-2,87	-2,69
	5,71	7,78	8,47	8,29	8,24	7,24
	0,73	0,86	0,50	0,30	0,34	0,82
36	6,11	6,86	15,18	25,72	22,56	6,87
	7,82	9,00	17,00	27,66	24,37	8,81
	-1,71	-2,14	-1,82	-1,94	-1,81	-1,94
	2,92	4,58	3,31	3,76	3,28	3,76
	0,37	0,51	0,19	0,14	0,13	0,43
42	6,43	7,25	15,67	26,11	22,93	7,22
	7,82	9,00	17,00	27,66	24,37	8,81
	-1,39	-1,75	-1,33	-1,55	-1,44	-1,59
	1,93	3,06	1,77	2,40	2,07	2,53
	0,25	0,34	0,10	0,09	0,09	0,29
48	6,53	7,30	15,83	26,18	23,35	7,39
	7,82	9,00	17,00	27,66	24,37	8,81
	-1,29	-1,70	-1,17	-1,48	-1,02	-1,42
	1,66	2,89	1,37	2,19	1,04	2,02
	0,21	0,32	0,08	0,08	0,04	0,23

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la sección 3.8.1.1. , tabla XXVII y apéndice

Apéndice 17. **Determinación de ji cuadrada para distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula manteniendo el número de incrementos constante en 35 y variando la masa de los incrementos pala de cargador frontal**

Masa de incrementos (Kg)	T1	T2	T3	T4	T5	T6
1	4,13	5,44	13,54	23,95	20,45	5,18
	7,82	9,00	17,00	27,66	24,37	8,81
	-3,69	-3,56	-3,46	-3,71	-3,92	-3,63
	13,62	12,67	11,97	13,76	15,37	13,18
	1,74	1,41	0,70	0,50	0,63	1,50
2	4,78	6,11	14,32	24,69	21,14	5,91
	7,82	9,00	17,00	27,66	24,37	8,81
	-3,04	-2,89	-2,68	-2,97	-3,23	-2,90
	9,24	8,35	7,18	8,82	10,43	8,41
	1,18	0,93	0,42	0,32	0,43	0,95
3	5,78	7,07	15,35	25,71	21,93	6,74
	7,82	9,00	17,00	27,66	24,37	8,81
	-2,04	-1,93	-1,65	-1,95	-2,44	-2,07
	4,16	3,72	2,72	3,80	5,95	4,28
	0,53	0,41	0,16	0,14	0,24	0,49
4	6,08	7,43	15,79	26,14	22,38	7,15
	7,82	9,00	17,00	27,66	24,37	8,81
	-1,74	-1,57	-1,21	-1,52	-1,99	-1,66
	3,03	2,46	1,46	2,31	3,96	2,76
	0,39	0,27	0,09	0,08	0,16	0,31
5	6,86	8,26	16,38	26,72	23,06	7,92
	7,82	9,00	17,00	27,66	24,37	8,81
	-0,96	-0,74	-0,62	-0,94	-1,31	-0,89
	0,92	0,55	0,38	0,88	1,72	0,79
	0,12	0,06	0,02	0,03	0,07	0,09

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la sección 3.8.1.1. , tabla XXVII, y apéndice

Apéndice 18. **Determinación de ji cuadrada para distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula manteniendo la masa de los incrementos constante en 3 kg y variando la cantidad de los incrementos en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída**

No. de incrementos	T1	T2	T3	T4	T5	T6
24	4,92	58,73	8,86	2,75	2,65	1,42
	7,33	69,78	11,49	4,21	3,87	2,94
	-2,41	-1,05	-2,63	-1,46	-1,22	-1,52
	5,81	122,10	6,92	2,13	1,49	2,31
	0,79	1,75	0,60	0,51	0,38	0,79
						4,82
30	5,36	63,34	9,81	3,27	2,94	1,68
	7,33	69,78	11,49	4,21	3,87	2,94
	-1,97	-6,44	-1,68	-0,94	-0,93	-1,26
	3,88	41,47	2,82	0,88	0,86	1,59
	0,53	0,59	0,25	0,21	0,22	0,54
						2,34
36	5,64	66,88	9,87	3,76	3,13	2,15
	7,33	69,78	11,49	4,21	3,87	2,94
	-1,69	-2,90	-1,62	-0,45	-0,74	-0,79
	2,86	8,41	2,62	0,20	0,55	0,62
	0,39	0,12	0,23	0,05	0,14	0,21
						1,14
42	5,86	67,23	10,11	3,87	3,26	2,31
	7,33	69,78	11,49	4,21	3,87	2,94
	-1,47	-2,55	-1,38	-0,34	-0,61	-0,63
	2,16	6,50	1,90	0,12	0,37	0,40
	0,29	0,09	0,17	0,03	0,10	0,14
						0,81
48	6,05	67,83	10,34	3,91	3,39	2,43
	7,33	69,78	11,49	4,21	3,87	2,94
	-1,28	-1,95	-1,15	-0,30	-0,48	-0,51
	1,64	3,80	1,32	0,09	0,23	0,26
	0,22	0,05	0,12	0,02	0,06	0,09
						0,56

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la sección 3.8.1.1. , tabla XXVII y apéndice

Apéndice 19. **Determinación de ji cuadrada para distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula manteniendo el número de incrementos constante en 35 y variando la masa de los incrementos en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída**

Masa de incrementos (Kg)	T1	T2	T3	T4	T5	T6
1	5,33	59,84	9,32	3,14	2,61	1,39
	7,33	69,78	11,49	4,21	3,87	2,94
	-2,00	-9,94	-2,17	-1,07	-1,26	-1,55
	4,00	98,80	4,71	1,14	1,59	2,40
	0,55	1,42	0,41	0,27	0,41	0,82
2	5,82	61,22	9,54	3,33	3,08	1,41
	7,33	69,78	11,49	4,21	3,87	2,94
	-1,51	-8,56	-1,95	-0,88	-0,79	-1,53
	2,28	73,27	3,80	0,77	0,62	2,34
	0,31	1,05	0,33	0,18	0,16	0,80
3	6,07	63,88	10,01	3,72	3,19	1,69
	7,33	69,78	11,49	4,21	3,87	2,94
	-1,26	-5,90	-1,48	-0,49	-0,68	-1,25
	1,59	34,81	2,19	0,24	0,46	1,56
	0,22	0,50	0,19	0,06	0,12	0,53
4	6,48	66,89	10,53	3,90	3,41	1,81
	7,33	69,78	11,49	4,21	3,87	2,94
	-0,85	-2,89	-0,96	-0,31	-0,46	-1,13
	0,72	8,35	0,92	0,10	0,21	1,28
	0,10	0,12	0,08	0,02	0,05	0,43
5	6,87	67,74	10,77	4,03	3,54	2,11
	7,33	69,78	11,49	4,21	3,87	2,94
	-0,46	-2,04	-0,72	-0,18	-0,33	-0,83
	0,21	4,16	0,52	0,03	0,11	0,69
	0,03	0,06	0,05	0,01	0,03	0,23

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la sección 3.8.1.1.,. tabla XXVII y apéndice

Apéndice 20. **Análisis de la prueba de bondad de ajuste ji cuadrada para distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula manteniendo la masa de los incrementos constante en 3 kg y variando la cantidad de los incrementos en pala de cargador frontal**

No. de incrementos	Grados de libertad	Ji cuadrada	Significancia (%)	Valor crítico ji cuadrada
24	5	8,87	0,65	3,325
			0,70	3,000
			0,75	2,675
			0,80	2,343
			0,85	1,994
			0,90	1,610
			0,95	1,145
			0,975	0,831
			0,980	0,752
			0,990	0,554
			0,995	0,412
30	5	3,55	0,65	3,325
			0,70	3,000
			0,75	2,675
			0,80	2,343
			0,85	1,994
			0,90	1,610
			0,95	1,145
			0,975	0,831
			0,980	0,752
			0,990	0,554
			0,995	0,412

Continuación del apéndice 20.

36	5	1,78	0,65	3,325
			0,70	3,000
			0,75	2,675
			0,80	2,343
			0,85	1,994
			0,90	1,610
			0,95	1,145
			0,975	0,831
			0,980	0,752
			0,990	0,554
			0,995	0,412
42	5	1,15	0,65	3,325
			0,70	3,000
			0,75	2,675
			0,80	2,343
			0,85	1,994
			0,90	1,610
			0,95	1,145
			0,975	0,831
			0,980	0,752
			0,990	0,554
			0,995	0,412
48	5	0,97	0,65	3,325
			0,70	3,000
			0,75	2,675
			0,80	2,343
			0,85	1,994
			0,90	1,610
			0,95	1,145
			0,975	0,831
			0,980	0,752
			0,990	0,554
			0,995	0,412

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la sección 3.8.1.2. , apéndice 16 y anexo 1.

Apéndice 21. **Análisis de la prueba de bondad de ajuste ji cuadrada para distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula manteniendo el número de incrementos constante en 35 y variando la masa de los incrementos en pala de cargador frontal**

Masa de incremento (Kg)	Grados de libertad	Ji cuadrada	Significancia (%)	Valor crítico ji cuadrada
1	5	6,48	0,65	3,325
			0,70	3,000
			0,75	2,675
			0,80	2,343
			0,85	1,994
			0,90	1,610
			0,95	1,145
			0,975	0,831
			0,980	0,752
			0,990	0,554
			0,995	0,412
2	5	4,23	0,65	3,325
			0,70	3,000
			0,75	2,675
			0,80	2,343
			0,85	1,994
			0,90	1,610
			0,95	1,145
			0,975	0,831
			0,980	0,752
			0,990	0,554
			0,995	0,412

Continuación del apéndice 21.

3	5	1,97	0,65	3,325
			0,70	3,000
			0,75	2,675
			0,80	2,343
			0,85	1,994
			0,90	1,610
			0,95	1,145
			0,975	0,831
			0,980	0,752
			0,990	0,554
			0,995	0,412
4	5	1,31	0,65	3,325
			0,70	3,000
			0,75	2,675
			0,80	2,343
			0,85	1,994
			0,90	1,610
			0,95	1,145
			0,975	0,831
			0,980	0,752
			0,990	0,554
			0,995	0,412
5	5	0,39	0,65	3,325
			0,70	3,000
			0,75	2,675
			0,80	2,343
			0,85	1,994
			0,90	1,610
			0,95	1,145
			0,975	0,831
			0,980	0,752
			0,990	0,554
			0,995	0,412

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la sección 3.8.1.2. , apéndice 17 y anexo 1.

Apéndice 22. **Análisis de la prueba de bondad de ajuste ji cuadrada para distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula manteniendo la masa de los incrementos constante en 3 kg y variando la cantidad de los incrementos en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída**

No. de incrementos	Grados de libertad	Ji cuadrada	Significancia (%)	Valor crítico ji cuadrada
24	5	4,82	0,65	3,325
			0,70	3,000
			0,75	2,675
			0,80	2,343
			0,85	1,994
			0,90	1,610
			0,95	1,145
			0,975	0,831
			0,980	0,752
			0,990	0,554
0,995	0,412			
30	5	2,34	0,65	3,325
			0,70	3,000
			0,75	2,675
			0,80	2,343
			0,85	1,994
			0,90	1,610
			0,95	1,145
			0,975	0,831
			0,980	0,752
			0,990	0,554
0,995	0,412			

Continuación del apéndice 22.

36	5	1,14	0,65	3,325
			0,70	3,000
			0,75	2,675
			0,80	2,343
			0,85	1,994
			0,90	1,610
			0,95	1,145
			0,975	0,831
			0,980	0,752
			0,990	0,554
			0,995	0,412
42	5	0,81	0,65	3,325
			0,70	3,000
			0,75	2,675
			0,80	2,343
			0,85	1,994
			0,90	1,610
			0,95	1,145
			0,975	0,831
			0,980	0,752
			0,990	0,554
			0,995	0,412
48	5	0,56	0,65	3,325
			0,70	3,000
			0,75	2,675
			0,80	2,343
			0,85	1,994
			0,90	1,610
			0,95	1,145
			0,975	0,831
			0,980	0,752
			0,990	0,554
			0,995	0,412

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la sección 3.8.1.2. , apéndice 18 y anexo 1.

Apéndice 23. **Análisis de la prueba de bondad de ajuste ji cuadrada para distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula manteniendo el número de incrementos constante en 35 y variando la masa de los incrementos en cinta transportadora haciendo un corte total de un de material en caída**

Masa de incremento (Kg)	Grados de libertad	Ji cuadrada	Significancia (%)	Valor crítico ji cuadrada
1	5	3,87	0,65	3,325
			0,70	3,000
			0,75	2,675
			0,80	2,343
			0,85	1,994
			0,90	1,610
			0,95	1,145
			0,975	0,831
			0,980	0,752
			0,990	0,554
			0,995	0,412
2	5	2,83	0,65	3,325
			0,70	3,000
			0,75	2,675
			0,80	2,343
			0,85	1,994
			0,90	1,610
			0,95	1,145
			0,975	0,831
			0,980	0,752
			0,990	0,554
			0,995	0,412

Continuación del apéndice 23.

3	5	1,61	0,65	3,325
			0,70	3,000
			0,75	2,675
			0,80	2,343
			0,85	1,994
			0,90	1,610
			0,95	1,145
			0,975	0,831
			0,980	0,752
			0,990	0,554
			0,995	0,412
4	5	0,81	0,65	3,325
			0,70	3,000
			0,75	2,675
			0,80	2,343
			0,85	1,994
			0,90	1,610
			0,95	1,145
			0,975	0,831
			0,980	0,752
			0,990	0,554
			0,995	0,412
5	5	0,40	0,65	3,325
			0,70	3,000
			0,75	2,675
			0,80	2,343
			0,85	1,994
			0,90	1,610
			0,95	1,145
			0,975	0,831
			0,980	0,752
			0,990	0,554
			0,995	0,412

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la sección 3.8.1.2. , apéndice 19 y anexo 1.

Apéndice 24. **Significado en función al color para análisis de prueba de bondad ji cuadrada**

Color	Significado
	El valor crítico de ji cuadrada es mayor al valor de ji cuadrada determinada, dando como resultado que a esas condiciones de masa e incrementos se puede asegurar que el muestreo se ajusta al patrón con el nivel de significancia indicado
	El valor crítico de ji cuadrada es menor al valor de ji cuadrada determinada, dando como resultado que a esas condiciones de masa e incrementos no se puede asegurar que el muestreo se ajuste al patrón con el nivel significancia indicado

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 25. **Distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula para la determinación del muestreo estadístico óptimo con dos deferentes combinaciones de masa e incrementos para muestreo en cargador frontal**

Tamiz		Porcentaje en función del tamaño (%)		
Tamaño				
(mm)	(pulg)	Patrón	36 incrementos con masa de 5 Kg	42 incrementos con masa de 4 Kg
75,00	3,00	7,82	6,23	6,04
63,00	2,50	9,00	7,00	6,91
50,00	2,00	17,00	15,53	15,42
37,50	1,50	27,66	25,68	25,57
31,50	1,25	24,37	22,85	22,77
25,00	1,00	8,81	6,79	6,65

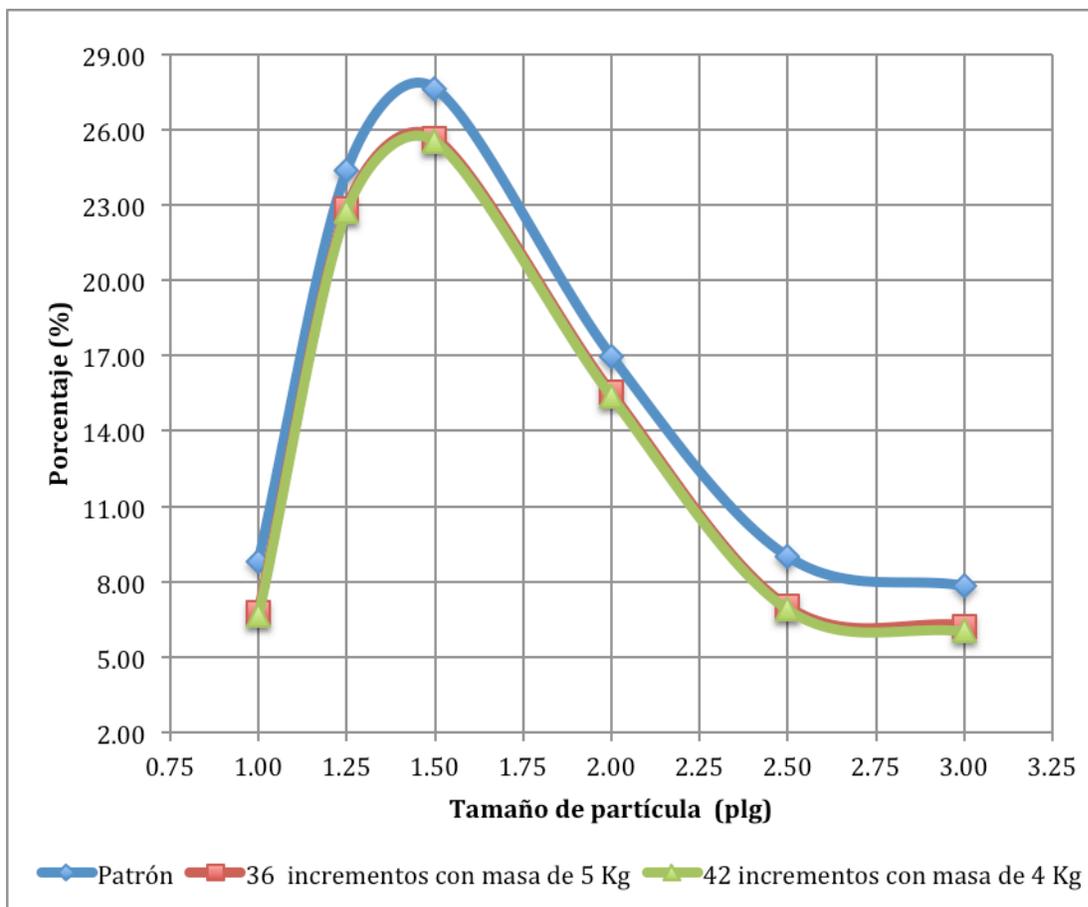
Fuente: elaboración propia, don datos obtenidos del apéndice 20 y 21.

Apéndice 26. **Distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula para determinación del muestreo estadístico óptimo con dos diferentes combinaciones de masa e incrementos para muestreo en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída**

Tamiz		Porcentaje en función del tamaño (%)		
Tamaño				
(mm)	(pulg)	Patrón	36 incrementos con masa de 3 Kg	36 incrementos con masa de 4 Kg
31,50	1,25	7,33	5,76	5,54
25,00	1,00	69,78	63,44	66,78
19,00	0,75	11,49	10,21	9,77
12,50	0,50	4,21	3,57	3,66
9,50	0,37	3,87	3,14	3,03
6,30	0,25	2,94	1,78	2,15

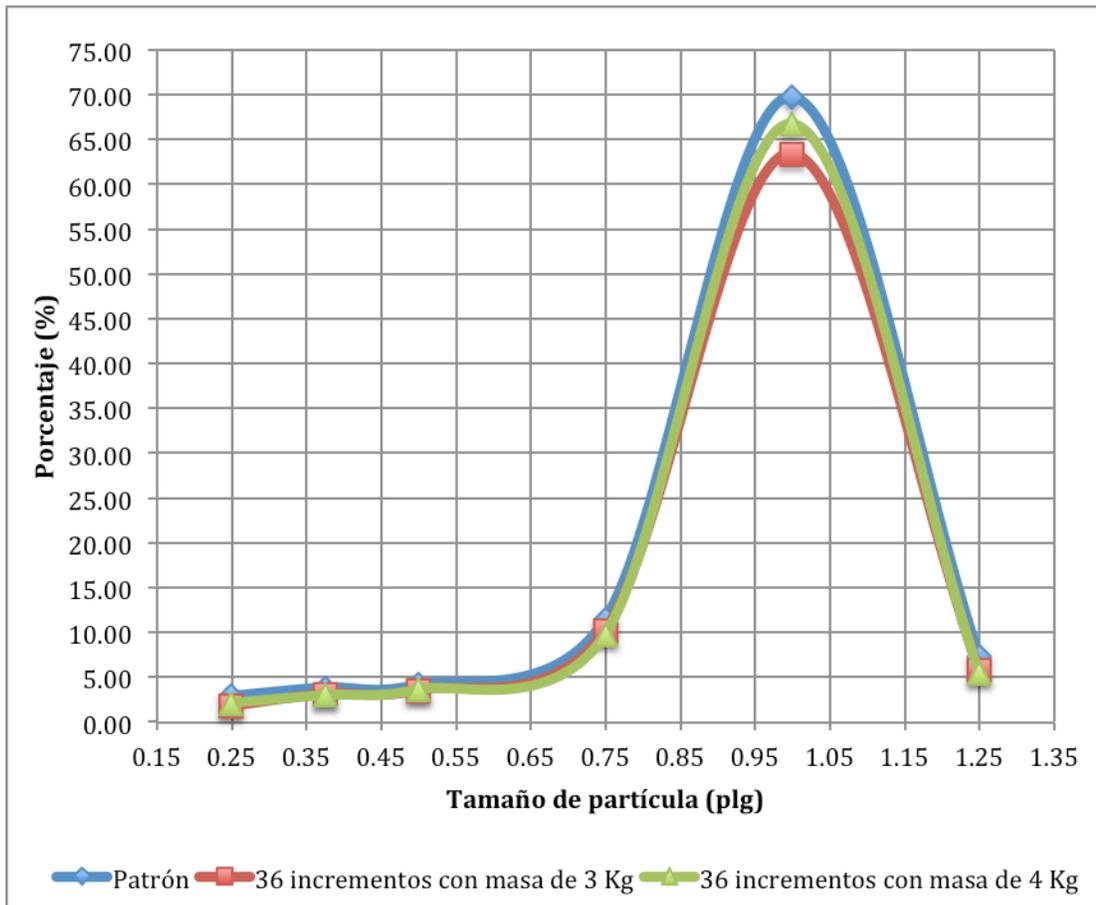
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del apéndice 22 y 23.

Apéndice 27. **Distribución de frecuencia en función del tamaño partícula para la determinación del muestreo estadístico óptimo con dos diferentes combinaciones de masa e incrementos para muestreo en pala de cargador frontal**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del apéndice 25.

Apéndice 28. **Distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula para la determinación del muestreo óptimo con dos diferentes combinaciones de masa e incrementos para muestreo en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del apéndice 26.

Apéndice. 29 **Determinación de ji cuadrada para distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula para la determinación del muestreo estadístico óptimo con dos diferentes combinaciones de masa e incrementos para muestreo en pala de cargador frontal**

Combinación de incrementos y masa	T1	T2	T3	T4	T5	T6
36 incrementos con masa de 5 Kg	6,23	7,00	15,53	25,68	22,85	6,79
	7,82	9,00	17,00	27,66	24,37	8,81
	-1,59	-2,00	-1,47	-1,98	-1,52	-2,02
	2,53	4,00	2,16	3,92	2,31	4,08
	0,32	0,44	0,13	0,14	0,09	0,46
42 incrementos con masa de 4 Kg	6,04	6,91	15,42	25,57	22,77	6,65
	7,82	9,00	17,00	27,66	24,37	8,81
	-1,78	-2,09	-1,58	-2,09	-1,60	-2,16
	3,17	4,37	2,50	4,37	2,56	4,67
	0,41	0,49	0,15	0,16	0,11	0,53

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la sección 3.8.1.1. , tabla XXVII y apéndice

25.

Apéndice 30. **Determinación de ji cuadrada para distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula para la determinación del muestreo estadístico óptimo con dos diferentes combinaciones de masa e incrementos para muestreo en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída**

Combinación de incrementos y masa	T1	T2	T3	T4	T5	T6
36 incrementos con masa de 3 Kg	5,76	63,44	10,21	3,57	3,14	1,78
	7,33	69,78	11,49	4,21	3,87	2,94
	-1,57	-6,34	-1,28	-0,64	-0,73	-1,16
	2,464	40,19	1,638	0,409	0,532	1,345
	0,336	0,576	0,142	0,097	0,137	0,457
36 incrementos con masa de 4 Kg	5,54	66,78	9,77	3,66	3,03	2,15
	7,33	69,78	11,49	4,21	3,87	2,94
	-1,79	-3	-1,72	-0,55	-0,84	-0,79
	3,204	9	2,958	0,302	0,705	0,624
	0,437	0,128	0,257	0,071	0,182	0,212

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la sección 3.8.1.1. , tabla XXVII y apéndice

26.

Apéndice 31. **Análisis de la prueba de bondad de ajuste ji cuadrada para distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula para la determinación del muestreo estadístico óptimo con dos diferente combinaciones de masa e incrementos para muestreo en pala de cargador frontal**

No. de incrementos	Masa de los incrementos (Kg)	Grados de libertad	Ji cuadrada	Significancia (%)	Valor crítico ji cuadrada
36	5	5	1,59	85	1,994
				86	1,917
				87	1,840
				88	1,764
				89	1,687
				90	1,610
				91	1,517
				92	1,424
				93	1,331
				94	1,238
42	4	5	1,83	85	1,994
				86	1,917
				87	1,840
				88	1,764
				89	1,687
				90	1,610
				91	1,517
				92	1,424
				93	1,331
				94	1,238
				95	1,145

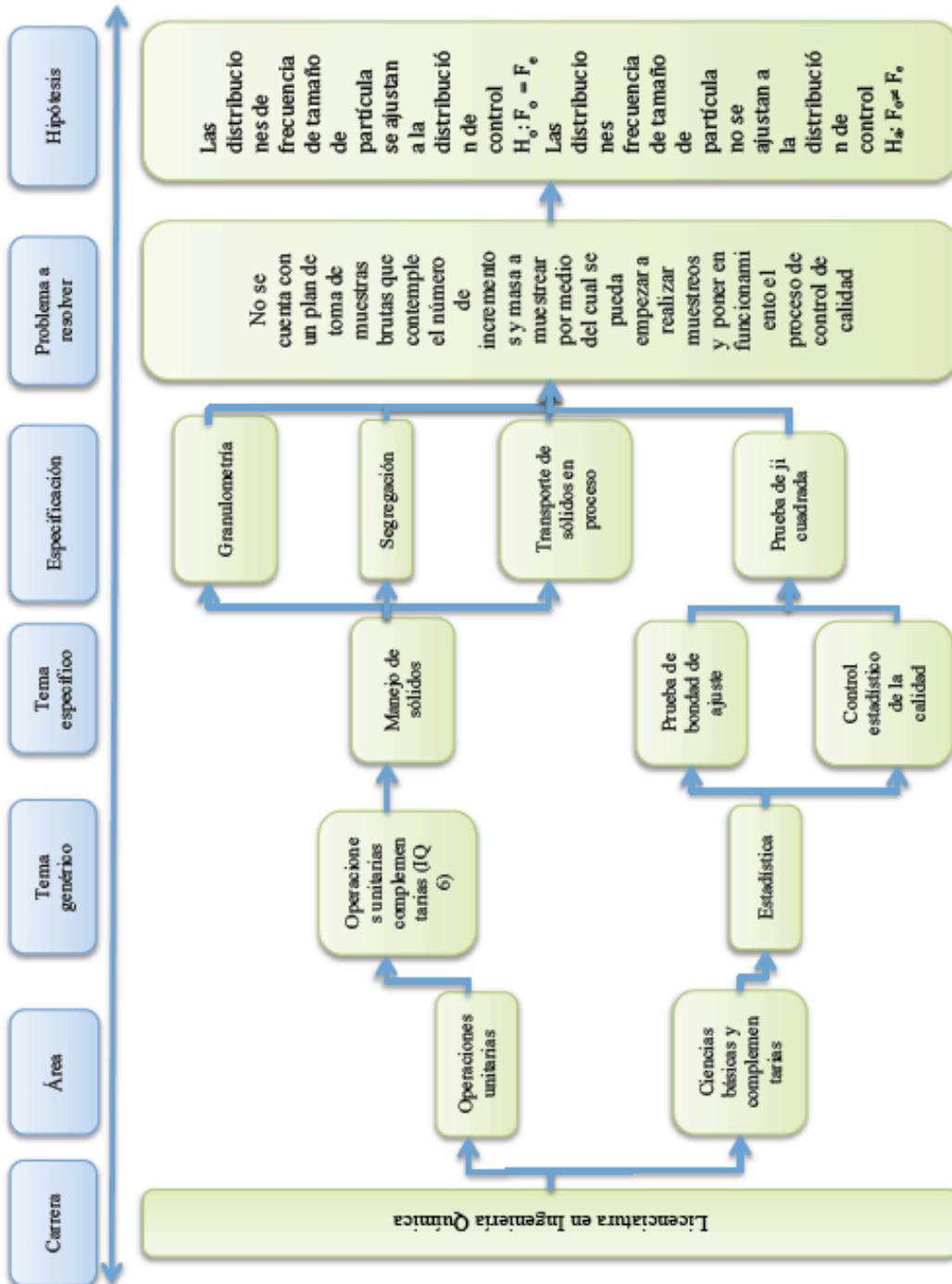
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la sección 3.8.1.2. , apéndice 29 y anexo 1.

Apéndice 32. **Análisis de la prueba de bondad de ajuste ji cuadrada para distribución de frecuencia en función del tamaño de partícula para la determinación del muestreo estadístico óptimo con dos diferentes combinaciones de masa e incrementos para muestreo en cinta transportadora haciendo un corte total de un chorro de material en caída**

No. de incrementos	Masa de los incrementos (Kg)	Grados de libertad	Ji cuadrada	Significancia (%)	Valor crítico ji cuadrada
36	3	5	1,75	85	1,994
				86	1,917
				87	1,84
				88	1,764
				89	1,687
				90	1,61
				91	1,517
				92	1,424
				93	1,331
				94	1,238
36	4	5	1,29	85	1,994
				86	1,917
				87	1,84
				88	1,764
				89	1,687
				90	1,61
				91	1,517
				92	1,424
				93	1,331
				94	1,238
				95	1,145

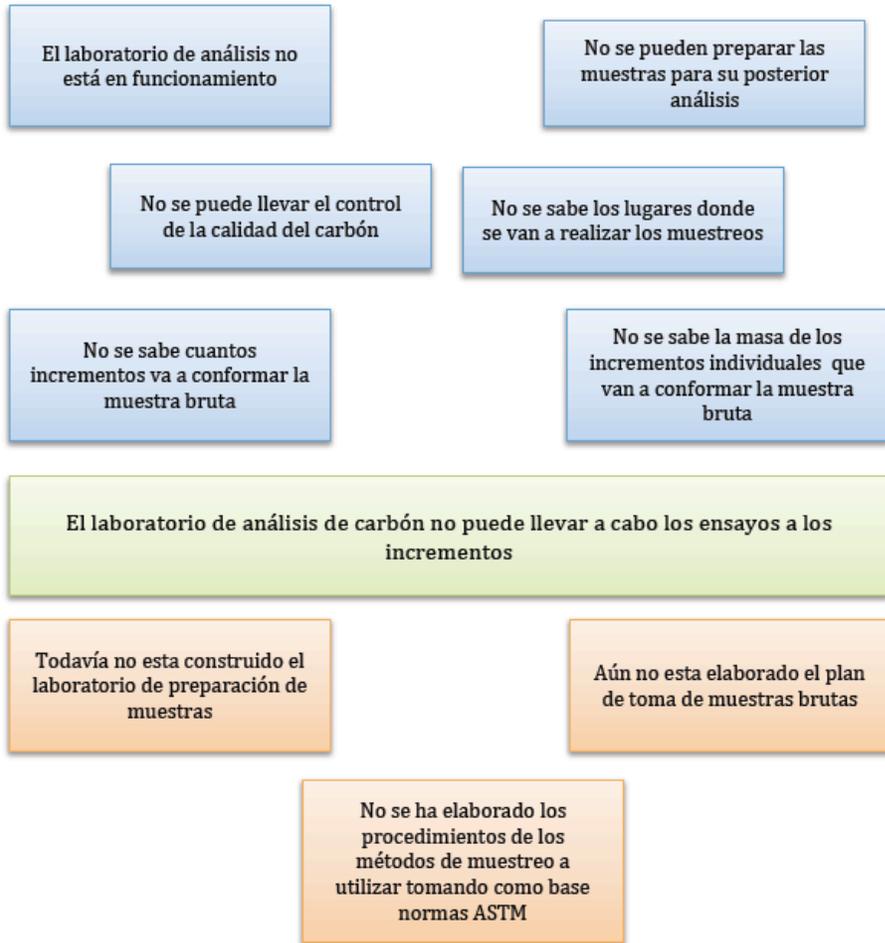
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la sección 3.8.1.2. , apéndice 30 y anexo 1.

Apéndice 33. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 34. **Árbol de problema**



Fuente: elaboración propia.

ANÉXOS

Anexo 1. Valores críticos de la distribución ji cuadrada

Gf	α									
	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	0,975	0,98	0,99
1	0,206	0,148	0,102	0,064	0,036	0,016	0,004	0,001	0,001	0,000
2	0,862	0,713	0,575	0,446	0,325	0,211	0,103	0,051	0,040	0,020
3	1,642	1,424	1,213	1,005	0,798	0,584	0,352	0,216	0,185	0,115
4	2,470	2,195	1,923	1,649	1,366	1,064	0,711	0,484	0,429	0,297
5	3,325	3,000	2,675	2,343	1,994	1,610	1,145	0,831	0,752	0,554

Fuente: Walpole, Donald E. Probabilidad y estadística para ingenieros. p. 755 y 756.

