

T  
628.168  
PRI



**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

**“Determinación De La Distribución De Tamaño Y Concentración  
De Partículas En Una Industria De Procesamiento De Agregados  
Utilizando Un Impactador De Cascada”.**

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentada por:

Julio Enrique Prieto Beltrán

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2003



CIB

D-32343

## **AGRADECIMIENTO**

**Al Ing. Mario Patiño Aroca por su acertada dirección e invaluable colaboración para la realización de esta tesis.**



## DEDICATORIA

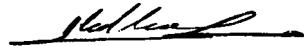
A MIS PADRES, QUIENES  
NOS ENSEÑARON A MIS  
HERMANOS Y A MÍ QUE EL  
CONOCIMIENTO SE  
ENCUENTRA EN LOS LIBROS  
Y LA SABIDURÍA EN LAS  
COSAS QUE HA CREADO  
DIOS.

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



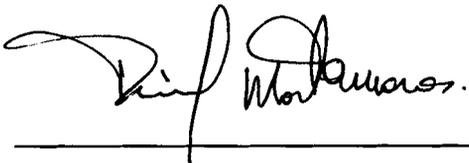
---

Ing. Francisco Andrade S.  
SUB DECANO DE LA FIMCP  
PRESIDENTE



---

Ing. Mario Patiño A.  
DIRECTOR DE TESIS



---

Ing. David Matamoros C.  
VOCAL

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL”.

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

lo muestra a  
  
Julio Enrique Prieto Beltrán

## **RESUMEN**

Uno de los principales inconvenientes que presenta la industria que se dedica al procesamiento de agregados para la construcción, es la contaminación atmosférica producida por material particulado en suspensión. A fin de poder dar recomendaciones específicas para mitigar este tipo de contaminación, se hace necesario estudiar experimentalmente las características físicas de las partículas en suspensión. Por este motivo esta tesis trata sobre el muestreo del material particulado en suspensión aplicado a este tipo de industria.

El objetivo principal de esta tesis es determinar la concentración y distribución de tamaño de las partículas que se generan durante el proceso de trituración de agregados. Otro de los objetivos es la elaboración de un protocolo experimental que establezca la metodología necesaria para efectuar el muestreo con el impactador de cascada, así como el manejo de la muestra a ser analizada gravimétricamente.

Para poder efectuar dicho muestreo se utilizó un impactador de cascada MSP MOUDI 100, el cual clasifica el material particulado en ocho fracciones

entre 0.18 y 18  $\mu\text{m}$ , mas la fracción entre 0 y 0.18  $\mu\text{m}$  que es colectada en un filtro final.



Una vez recolectadas las muestras, se determinaron los niveles de concentración del polvo en función de su diámetro aerodinámico. Además, se generaron gráficas de la distribución de tamaño de las partículas y se efectuó un análisis de regresión estadística para determinar los parámetros (media y desviación estándar) que describen a los diferentes modos encontrados en las muestras.

CIB-ES

Las gráficas de distribución de tamaño fueron de tipo bimodal, con dos fases bien marcadas (partículas finas y gruesas), se obtuvieron altos niveles de fracción respirable en todos los procesos lo cual puede afectar la salud de los trabajadores a largo plazo.



# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN .....	I
INDICE GENERAL.....	II
ABREVIATURAS .....	III
SIMBOLOGÍA .....	IV
INDICE DE FIGURAS.....	V
INDICE DE TABLAS .....	VI
INDICE DE GRAFICOS .....	VII
INDICE DE MAPAS .....	VIII
INTRODUCCIÓN .....	1
<b>CAPÍTULO 1</b>	
1. CONCEPTOS BÁSICOS .....	3
1.1 Contaminación atmosférica.....	3
1.2 Efectos del Material Particulado.....	6
1.3 Material Particulado Atmosférico.....	17
1.4 Partículas primarias y secundarias.....	19
1.5 Características de las partículas en función de su tamaño.....	22
1.6 Partículas PM2.5 y PM 10. ....	25

## **CAPÍTULO 2**

2. IMPACTADOR DE CASCADA.....	28
2.1 Principio de Funcionamiento.....	28
2.2 Descripción y Operación del Equipo (MOUDI) .....	32
2.3 Calibración del Impactador de Cascada.....	46

## **CAPÍTULO 3**

3. MÉTODOS EXPERIMENTALES .....	53
3.1 Protocolo para muestreo de partículas usando el impactador de cascada .....	53
3.2 Protocolo para el uso de la balanza analítica.....	71
3.3 Protocolo para el manejo de muestras y su análisis gravimétrico ...	74

## **CAPÍTULO 4**

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	85
4.1 Cálculo de concentraciones de masa.....	86
4.2 Histograma de la Distribución de Masa de Partículas en función de su diámetro aerodinámico.....	92
4.3 Distribución acumulativa de masa en función de su diámetro aerodinámico.....	97
4.4 Cálculo de la media geométrica y de la desviación estándar geométrica usando distribuciones lognormales.....	100

4.5 Cálculo de fracción respirable y de la fracción PM10..... 111

## CAPÍTULO 5

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones..... 117

5.2 Recomendaciones..... 130

## APÉNDICES

## BIBLIOGRAFÍA

## ABREVIATURAS

ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEN	Comité Européen Normalisation
CFR 40	Code Federal Regulations
DOS	Diocetyl Sebacate
EAD	Electrical Aerosol Detector
ECD	Effective Cutoff Diameter
EPA	Environmental Protection Agency
g/cm <sup>3</sup>	Gramos por Centímetro Cúbico
GEMS	Global Environment Monitoring System
GSD	Geometric Standard Deviation
HR	Humedad Relativa
HVS	High Volume Sampling
ISO	International Standardization Organization
L/min	Litros por Minuto
m	Metro
mg	Miligramo
mg/cm <sup>2</sup>	Miligramo por Centímetro Cuadrado
MMD	Mass Median Diameter
MOUDI	Micro Orifice Uniform Deposit Impactor
OMS	Organización Mundial de la Salud
PM <sub>2.5</sub>	Material Particulado Menor a 2.5 Micrómetros
PM <sub>4</sub>	Material Particulado Menor a 4 Micrómetros
PM <sub>10</sub>	Material Particulado Menor a 10 Micrómetros
p.p.m	Partes Por Millón
psi	Pounds Square Inch
PSL	Polystyrene Latex
PST	Partículas Suspendidas Totales
UNEP	United Nations Environmental Programme.
USEPA	United States Environmental Protection Agency
VOMAG	Vibrating Orifice Monodisperse Aerosol Generator
µg	Microgramo
µg/m <sup>3</sup>	Microgramo por Metro Cúbico
µm	Micrómetro

## SIMBOLOGÍA

C	Factor de corrección
°C	Grados Centígrados
CO	Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	Anhídrido Carbónico
D <sub>p</sub>	Diámetro de la Partícula
D <sub>16%</sub>	Diámetro Aerodinámico de la Partícula al 16%
D <sub>50</sub>	Diámetro Aerodinámico de la Partícula al 50%
D <sub>84%</sub>	Diámetro Aerodinámico de la Partícula al 84%
D <sub>p50</sub>	Diámetro de Partículas Colectadas con 50 % de Eficiencia
°F	Grados Fahrenheit
NO <sub>x</sub>	Óxidos de Nitrógeno
O <sub>3</sub>	Ozono
Po 210	Polonio 210
RF	Promedio de la Fracción Respirable
RF <sub>LL</sub>	Fracción Respirable en el Límite Menor del Intervalo
RF <sub>MP</sub>	Fracción Respirable en el Punto Medio del Intervalo
RF <sub>UL</sub>	Fracción Respirable en el Límite Superior del Intervalo
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Azufre
SO <sub>x</sub>	Óxidos de Azufre
St	Número de Stokes
q	Flujo Volumétrico a Través de la Boquilla
V <sub>0</sub>	Velocidad Promedio del Aire a la Salida de la Boquilla
W	Diámetro de la Boquilla
μ	Viscosidad del Aire
ρ <sub>p</sub>	Densidad de la Partícula

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1.1. Depósito de Partículas en el Tracto Respiratorio de Acuerdo a sus Diámetros.....	7
Figura 1.2. Fracciones de Tamaño de Partículas Inhalable, Torácica y Respirable, en Ambientes de Trabajo.....	8
Figura 1.3. Partículas de Formas Diferentes.....	21
Figura 1.4. Esquema de una Distribución Típica de Partículas en la Atmósfera. ....	24
Figura 2.1. Diámetros Aerodinámicos de Partículas según su Diámetro de Stokes, Forma y Densidad. ....	34
Figura 2.2. Impactador de Cascada MSP 100 .....	37
Figura 2.3. Partes de un Impactador de Cascada MSP 100 .....	40
Figura 3.1. Etapas de un Impactador de Cascada.....	69
Figura 3.2. Filtro Utilizado Durante un Muestreo.....	78
Figura 3.3. Substratos de las Diferentes Etapas Posterior a un Muestreo.....	83
Figura 4.1. Concentración vs Diámetro de Partícula 15-05-02 .....	89
Figura 4.2. Concentración vs Diámetro de Partícula 10-06-02 .....	90
Figura 4.3. Concentración vs Diámetro de Partícula 24-06-02 .....	91
Figura 4.4. Histograma de la Distribución de Masa de Partículas 15-05-02 .....	94
Figura 4.5. Histograma de la Distribución de Masa de Partículas 10-06-02 .....	95
Figura 4.6. Histograma de la Distribución de Masa de Partículas 24-06-02 .....	96

Figura 4.7. Distribución de Masa Acumulada en Función de su Diámetro 15-05-02.....	99
Figura 4.8. Distribución de Masa Acumulada en Función de su Diámetro 10-06-02 .....	99
Figura 4.9. Distribución de Masa Acumulada en Función de su Diámetro 24-06-02 .....	100
Figura 4.10. Histograma de una Distribución Lognormal .....	101
Figura 4.11. Histograma de una Distribución Bimodal .....	102
Figura 4.12. Distribución Log Probabilística de Partículas Pequeñas 15-05-02 .....	105
Figura 4.13. Distribución Log Probabilística de Partículas Grandes 15-05-02.....	106
Figura 4.14. Distribución Log Probabilística de Partículas Pequeñas 10-06-02 .....	107
Figura 4.15. Distribución Log Probabilística de Partículas Grandes 10-06-02 .....	108
Figura 4.16. Distribución Log Probabilística de Partículas Pequeñas 24-06-02 .....	109
Figura 4.17. Distribución Log Probabilística de Partículas Grandes 24-06-02.....	110
Figura 4.18. Material Particulado Respirable Según Criterio de la ACGIH.....	112

## ÍNDICE DE TABLAS

		Pag.
Tabla 1	Diseño y Parámetros de Operación del MOUDI MSP	
	Modelo 100 .....	36
Tabla 2	Calendario de Mediciones.....	60
Tabla 3	Equipos Utilizados en el Muestreo de Partículas .....	67
Tabla 4	Tipos de Filtro para Muestreo de Partículas Suspendidas...	79
Tabla 5	Características Del Filtro Pallflex 2500 QAT -UP .....	80
Tabla 6	Datos de Muestreo y Concentración de Partículas	
	15-05-02 .....	89
Tabla 7	Datos de Muestreo y Concentración de Partículas	
	10-06-02 .....	90
Tabla 8	Datos de Muestreo y Concentración de Partículas	
	24-06-02 .....	91
Tabla 9	Datos para Elaboración de Histograma de Partículas	
	15-05-02 .....	94
Tabla 10	Datos para Elaboración de Histograma de Partículas	
	10-06-02 .....	95
Tabla 11	Datos Para Elaboración De Histograma De Partículas	
	24-06-02 .....	96
Tabla 12	Datos de Distribución Lognormal Partículas Pequeñas	
	15-05-02 .....	105
Tabla 13	Datos de Distribución Lognormal Partículas Grandes	
	15-05-02 .....	106
Tabla 14	Datos de Distribución Lognormal Partículas Pequeñas	
	10-06-02 .....	107
Tabla 15	Datos de Distribución Lognormal Partículas Grandes	
	10-06-02 .....	108

Tabla 16	Datos de Distribución Lognormal Partículas Pequeñas 24-06-02 .....	109
Tabla 17	Datos de Distribución Lognormal Partículas Grandes 24-06-02 .....	110
Tabla 18	Fracción Respirable Promedio .....	114
Tabla 19	Fracción Respirable y Fracción Pm 10 15-05-02 .....	115
Tabla 20	Fracción Respirable y Fracción Pm 10 10-06-02 .....	115
Tabla 21	Fracción Respirable y Fracción Pm 10 24-06-02 .....	116

## ÍNDICE DE GRAFICOS

	Pag.
Gráfico 2.1. Principio de Funcionamiento de un Impactador de Cascada .....	29
Gráfico 2.2. Esquema de una Etapa de un Impactador de Cascada .....	39
Gráfico 2.3. Esquema de Calibración de un Impactador de Cascada.....	47
Gráfico 2.4. Curvas de Eficiencia de Colección de Partículas .....	50
Gráfico 2.5. Pérdidas en un Impactador de Cascada .....	51





CIB-ES

## ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1      Ubicación de los Sitios de Muestreo

## **INTRODUCCIÓN**

El material particulado aerotransportado representa una mezcla compleja de sustancias orgánicas e inorgánicas. Los aerosoles contaminantes se encuentran compuestos de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire o son una mezcla de ambas. Estas partículas varían en su tamaño, composición y origen. Este tipo de material se divide en dos grupos principales: partículas gruesas y partículas finas, las primeras se ubican en un rango de tamaño mayor a 2.5  $\mu\text{m}$ , mientras que el segundo grupo abarca las partículas menores a 2.5  $\mu\text{m}$ .

El objetivo de esta tesis es analizar la concentración y distribución del tamaño de partículas de aerosoles producidos por procesos de trituración de tres materiales diferentes (yeso, caliza y arcilla).

La metodología utilizada en este trabajo consistió en determinar la concentración de partículas de diferentes tamaños, así como la determinación de la fracción respirable del total del material capturado. Se realizaron mediciones en tres ambientes diferentes, durante dos días laborables y uno sin producción, cada medición se realizó en la jornada laboral (8 horas).

Para estos efectos, se utilizó un impactador de cascada MOUDI MSP 100, el cual trabaja a un caudal de 30 litros/min, El equipo muestreador de aire

succiona aire ambiente, a una tasa de flujo constante, el aire pasa por ocho etapas de diferentes tamaños que van desde 18  $\mu\text{m}$  hasta 0.18  $\mu\text{m}$ , en donde la materia en suspensión particulada es separada inercialmente y colectada en diferentes substratos de acuerdo a su diámetro aerodinámico y deja pasar las partículas menores a 0.18  $\mu\text{m}$  hacia un filtro de alta eficiencia.

Los substratos y filtro son pesados, luego de un período de equilibrio con la humedad del ambiente del laboratorio donde está la balanza, antes y después de cada prueba, para determinar la masa neta ganada durante la colección de partículas.

Con los datos obtenidos se obtuvieron valores de concentraciones de los tres materiales, se generaron curvas e histogramas de distribución de tamaño y se calculó la fracción respirable a la cual están expuestos los trabajadores.

# **CAPÍTULO 1**

## **1. CONCEPTOS BÁSICOS**

### **1.1. Contaminación Atmosférica.**

Se entiende por **contaminación atmosférica** la presencia en el aire de sustancias y formas de energía que alteran la calidad del mismo, de tal manera que implique riesgos, daño o molestia grave para las personas, animales, plantas y bienes de cualquier naturaleza.

Todas las actividades realizadas por el hombre, el metabolismo de la materia humana y los fenómenos naturales que se producen en la superficie o en el interior de la tierra van acompañados de emisiones de gases, vapores, polvos y aerosoles. Estos, al difundirse hacia la atmósfera, se integran en los diferentes ciclos biogeoquímicos que se desarrollan en la Tierra.

De la definición de contaminación atmosférica, se desprende que para que una sustancia sea considerada contaminante o no dependerá de los efectos que produzca sobre sus receptores. Se consideran contaminantes aquellas sustancias que pueden dar lugar a riesgo o daño, para las personas o bienes en determinadas circunstancias.

El proceso de polución de la atmósfera se inicia al introducir en ella los contaminantes y continúa con la presencia de los mismos en el medio gaseoso, siendo función de las propiedades de los compuestos y de las condiciones ambientales.

La medida del nivel de contaminación debe realizarse desde la emisión de las sustancias. Por emisión se entiende la cantidad total de producto que se deposita en la atmósfera desde la fuente de la que procede.

La inmisión es la transferencia de contaminantes del aire desde la atmósfera libre a un receptor tal como un ser humano, planta o edificio. La suma de las inmisiones en un intervalo de tiempo da la dosis de inmisión, o sea la cantidad total de contaminantes del aire admitido, aspirado, absorbido o ingerido por parte del receptor. De acuerdo a esta definición, inmisión es la tasa, medida o proporción de masa, u otra propiedad cuantificable determinada por unidad de intervalo de tiempo, la cual debe ser medida en lo posible en el receptor.

Las partículas pueden provenir de diferentes fuentes de emisión, como pueden ser: procesos de combustión en la industria, minería y/o procesos de incineración de basura, motores de vehículos, etc.

Las fuentes de emisiones pueden ser clasificadas como fuentes de punto y fuentes de zona. Las fuentes de punto son grandes fuentes de emisiones que son tratadas en base de punto a punto en los inventarios de emisiones. Estas son típicamente instalaciones industriales, servicios públicos o fuentes de emisiones comerciales o institucionales. Las fuentes de zona se definen como fuentes de emisiones que son demasiado numerosas o dispersas para ser tratadas individualmente en un inventario de emisiones.

Las fuentes naturales de emisión de partículas incluyen a los volcanes, incendios forestales, tormentas de arena, polen, pulverización del mar, emanaciones biogénicas, etc. La mayoría de las emisiones producidas por el hombre proceden de carreteras o calles (pavimentadas o no), actividades de construcción, agricultura, actividades mineras e industriales.

La mitad del material particulado urbano está formado por negro de grafito procedente de la combustión de carburantes fósiles, principalmente en automotores, sobretudo los que funcionan con motor diesel. También contribuyen a su formación las centrales térmicas y las industrias que operan con fuel oil o carbón.

Las partículas sólidas en suspensión actúan como agentes de condensación del vapor de agua presente en la atmósfera. Por ello, el material particulado puede participar en procesos químicos que ocurren en la atmósfera urbana, actuando incluso de catalizadores.

## **1.2. Efectos del Material Particulado**

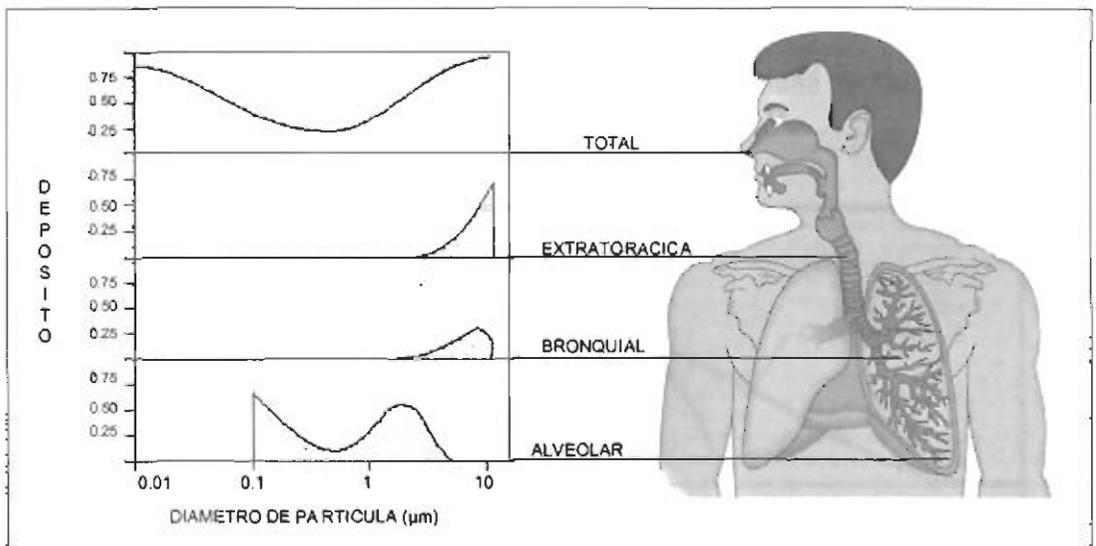
Los agentes contaminadores son sustancias que se encuentran presentes en concentraciones por encima de las normales, y que son dañinas para la vida y los materiales.

El impacto de agentes contaminadores es determinado por el efecto en los receptores de la contaminación. Por ejemplo, los contaminantes del aire pueden acelerar el desgaste por la acción atmosférica de edificios, dañan la vegetación, inducen cambios del clima, causan problemas de respiración e incluso aumentan la tasa de mortalidad.

### **Efectos sobre la salud.**

El material particulado en suspensión como un contaminante del aire incluye una amplia clase de sustancias líquidas o sólidas con una variedad de propiedades físicas y químicas. Una característica importante es su tamaño, dado que partículas grandes no son colectadas por el sistema respiratorio del ser humano, por lo que no son consideradas dañinas a la salud.

Las partículas con diámetro aerodinámico menor o igual a  $10\ \mu\text{m}$ , usualmente mencionada como  $\text{PM}_{10}$ , pueden penetrar las vías respiratorias y llegar a los pulmones, depositándose en las paredes alveolares. La mayoría de las partículas cuyo diámetro es mayor a  $5\ \mu\text{m}$  se depositan en las vías aéreas superiores (nariz), en la tráquea y los bronquios. Aquellas cuyo diámetro es inferior, tienen mayor probabilidad de depositarse en los bronquiolos y alvéolos y a medida que su tamaño disminuye son más dañinas.

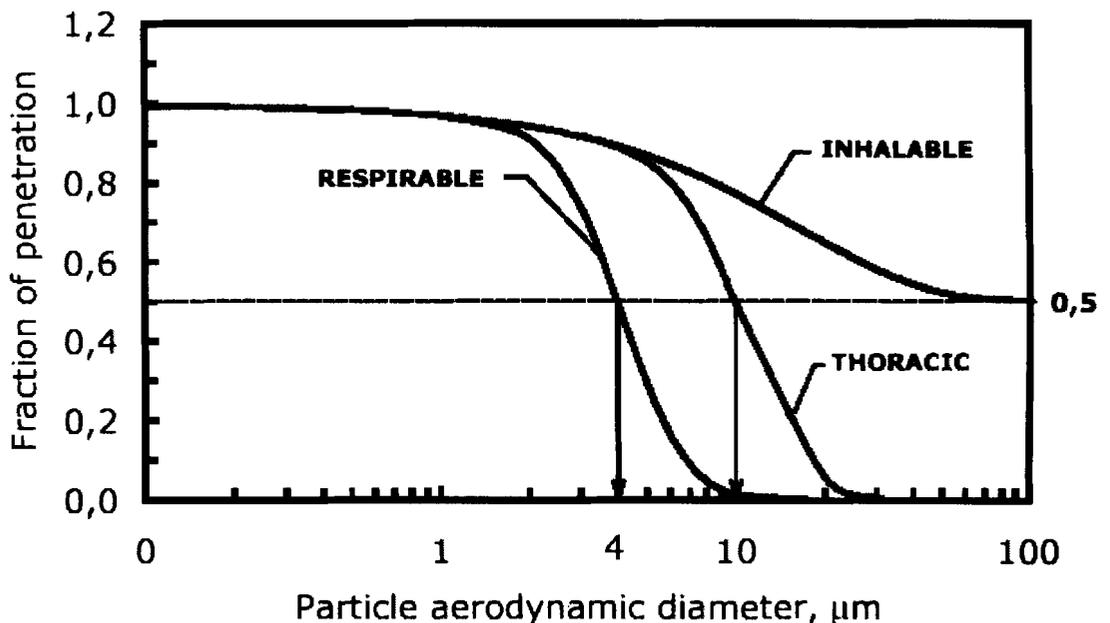


**FIGURA 1.1. DEPÓSITO DE PARTÍCULAS EN EL TRACTO RESPIRATORIO DE ACUERDO A SUS DIÁMETROS (Dr. Lothar Laskus)**

La fracción de partículas aerotransportadas que son inhaladas por el cuerpo humano, depende de las propiedades de las partículas, del movimiento del aire alrededor del cuerpo, velocidad y dirección, patrón de respiración y si ésta se lleva a cabo por la nariz o por la boca.

Estas partículas inhaladas pueden depositarse en el tracto respiratorio o exhalarse, la probabilidad depende de una gran cantidad de factores y varía de una persona a otra. Sin embargo es posible definir valores típicos promedio de depósito de partículas en el tracto respiratorio de acuerdo a sus diámetros (ver figura 1.1).

Debido a que el daño en la salud del individuo estará en función de dónde se depositen las partículas y del tipo de partícula que entra al tracto respiratorio, se han implementado muestreos selectivos en cuanto al tamaño de las partículas sobre todo cuando los muestreos se relacionan con la salud.



**FIGURA 1.2. FRACCIONES DE TAMAÑO DE PARTICULAS INHALABLE, TORÁCICA Y RESPIRABLE, EN AMBIENTES DE TRABAJO. (CEN, ISO Y ACGIH).**

De esta manera la ISO, ha dado definiciones para las diferentes fracciones de partículas suspendidas, con la finalidad de establecer convenciones que fijen curvas para los instrumentos de colección de una fracción dada. Siendo estas definiciones las que se resumen a continuación.

**Total de Partículas Aerotransportadas:** Se definen como todas las partículas rodeadas por aire en un volumen de aire dado.

**Fracción Inhalable:** Fracción de la masa del total de partículas aerotransportadas, la cual es inhalada por la boca o la nariz. El 50% de estas partículas corresponden a un diámetro aerodinámico de 100  $\mu\text{m}$ .

**Fracción Extratorácica:** Fracción de la masa de las partículas inhaladas, las cuales no penetran más allá de la laringe. En esta fracción se incluye el polen.

**Fracción Torácica:** Fracción de la masa de las partículas inhaladas, las cuales penetran más allá de la laringe, refiriéndose a la región de los bronquios.

El 50% de estas partículas corresponden a diámetros aerodinámicos que se encuentran en el rango de 0 a 10  $\mu\text{m}$ ., conocidas como  $\text{PM}_{10}$  ( $D_{50} = 10\mu\text{m}$ ), no aceptando partículas mayores a 30  $\mu\text{m}$ . (diámetro de corte superior).

**Fracción Traqueobronquial:** Fracción de la masa de las partículas inhaladas que penetran más allá de la laringe, pero que no llegan a los conductos aéreos no ciliados. Aproximadamente el 50% de estas partículas corresponden también a diámetros de 0 a 10  $\mu\text{m}$ .

**Fracción Respirable:** Fracción de la masa de las partículas inhaladas que penetran a los conductos aéreos no ciliados. También se les conoce como Fracción Alveolar. El 50% de estas partículas corresponden a diámetros de 4  $\mu\text{m}$ . para una población adulta saludable y de 2.5  $\mu\text{m}$ . para población de alto riesgo ( $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ ). En la figura 1.2. se muestran curvas que representan la fracción de penetración de las partículas dependiendo de su diámetro aerodinámico, las tres curvas corresponden a las fracciones Inhalable, Torácica y Respirable.

Una vez que las partículas se han depositado en el sistema respiratorio, su acción irritante es producto por una parte, de su composición química y su toxicidad y, por otra, de su facilidad de absorber y adsorber otras sustancias en su superficie, produciéndose un efecto sinérgico que incrementa su agresividad.

La distinta solubilidad de las partículas, según su carga química, determinará su transferencia a la sangre. La deposición de partículas en el sistema respiratorio depende de tres fuerzas físicas:

**a) Fuerzas inerciales:** Son las causales de deposición en la nasofaringe. La inercia es muy importante en los grandes conductos del sistema respiratorio, especialmente cuando se requiere respiración rápida forzada. Su importancia decrece mientras más adentro del sistema respiratorio se encuentren las partículas.

**b) Sedimentación gravitacional:** Es proporcional a la velocidad de deposición de la partícula y al tiempo disponible para sedimentar. Como la velocidad decrece en los conductos estrechos del sistema, el efecto gravitacional se ve aumentado.

**c) Difusión:** En el caso de partículas finas, la fuerza más importante es la de difusión y conduce a una sedimentación en las paredes de los ductos finos del sistema, como es el espacio alveolar. Esta fuerza es una magnitud significativa para partículas de diámetro superior a  $0,5 \mu\text{m}$ . La función irritante de las partículas no es función sólo de la naturaleza de las mismas, sino de la facilidad de absorber o adsorber otras sustancias en la superficie de ellas, que en ciertas ocasiones da lugar al sinergismo. Los efectos en salud vinculados a la exposición a este contaminante son: aumento en la frecuencia de cáncer pulmonar, muertes prematuras, síntomas respiratorios severos, irritación de ojos y nariz, agravamiento en casos de asma, agravamiento en caso de enfermedades cardiovasculares, etc.

### **Efectos del material particulado sobre la flora y fauna.**

Las plantas muestran una especial sensibilidad a la mayor parte de los contaminantes del aire, y sufren daños significativos a concentraciones mucho más bajas que las necesarias para causar efectos perjudiciales sobre la salud humana y animal.

Es muy difícil establecer valores límites de la contaminación atmosférica a partir de los cuales los efectos negativos se empiezan a manifestar, estos dependen de la constitución de la planta y de la especie de que se trate. Por otra parte, los efectos producidos por la contaminación atmosférica se pueden manifestar por la alteración de diversos mecanismos vitales de las plantas. Así, las funciones metabólicas y los tejidos vegetales se pueden ver afectados como consecuencia de la acción de gases como el anhídrido sulfuroso, el monóxido de carbono y los compuestos de flúor.

Los daños causados se manifiestan en forma de necrosis foliar en áreas localizadas que presentan un color marrón-rojizo-blanco, de clorosis, adquiriendo el tejido una coloración verde pálida o amarilla, o por la aparición de manchas puntuales necróticas. Si la acción del contaminante es muy fuerte puede llegar a paralizar el crecimiento de la planta.

El impacto que las partículas en suspensión provocan sobre la vegetación no es muy conocido, sin embargo se ha comprobado que al depositarse sobre

las hojas de las plantas, las partículas más pequeñas taponan las estomas interfiriendo el normal desarrollo de la fotosíntesis.

Entre los distintos contaminantes que se presentan generalmente en el aire ambiente, el  $\text{SO}_2$  es el que tiene mayor importancia debido a la gran toxicidad que tiene para la vegetación. Los daños producidos por el  $\text{SO}_2$  a las plantas obedecen a la exposición a altas concentraciones durante períodos cortos; o por la exposición a concentraciones relativamente bajas durante largos períodos.

La naturaleza de las partículas (química) es determinante al evaluar los daños producidos sobre la vegetación, aquellas que contienen fluoruros son perjudiciales y las de óxido de magnesio influyen negativamente en el crecimiento de la planta.

Las partículas que contienen fluoruros parecen causar daños en las plantas, y el óxido de magnesio que cae sobre los terrenos agrícolas ha dado como resultado un insatisfactorio crecimiento de las plantas.

El flúor y sus derivados son contaminantes del aire que se caracterizan por ser tóxicos en general para las plantas a muy pequeñas concentraciones. La sensibilidad de las plantas a la acción del flúor varía, como en el caso del  $\text{SO}_2$ , según las especies y las condiciones del medio.

La salud de un animal puede sufrir cuando éste se alimenta de plantas cubiertas por material particulado tóxico. Dichos compuestos pueden ser absorbidos por los tejidos de la planta o pueden permanecer como contaminantes sobre la superficie de las plantas.

Un aspecto importante del efecto acumulativo del flúor es su transmisión a través de las cadenas alimentarias. El mecanismo es el siguiente: el flúor presente en el aire se acumula en los pastos y de éstos pasa a los animales, siendo los bovinos los más afectados. La acumulación del flúor en los tejidos puede causar la aparición de la fluorosis, enfermedad que se presenta sobre todo en el ganado vacuno. Observaciones realizadas muestran que la ingestión de pastos puede ser tolerada sin efectos negativos, cuando su concentración en flúor no supera los 40 p.p.m como media durante todo el año.

### **Efectos del material particulado sobre los materiales**

Las partículas arrastradas por el aire pueden ser químicamente inertes o químicamente activas; podrán ser inertes pero absorben de la atmósfera sustancias químicamente activas; o si no, se pueden combinar para formar especies químicamente activas. Dependiendo de su composición química y estado físico, las partículas causan grandes daños a los materiales. Las partículas ensucian las superficies pintadas, la ropa y las cortinas, con sólo asentarse sobre ellas.

El costo de repintar las superficies interiores y exteriores de las casas y edificios y la limpieza y reposición de las materias textiles se estima en cientos de millones de dólares anuales.

Lo que es más importante, las partículas pueden causar daños químicos directos sobre los materiales, ya sea por corrosividad intrínseca o por la acción de sustancias químicas corrosivas adsorbidas o absorbidas, por partículas inertes emitidas a la atmósfera.

En general, los metales pueden resistir la corrosión en aire seco o aun en el aire limpio y húmedo. Sin embargo, las partículas hidrosκόpicas que se encuentran usualmente en la atmósfera pueden corroer las superficies metálicas sin que esté presente contaminante alguno.

La acción de los contaminantes atmosféricos sobre los materiales puede manifestarse por la sedimentación de partículas sobre la superficie de los mismos, afeando su aspecto externo, o por ataque químico al reaccionar el contaminante con el material.

Los SO<sub>x</sub> causan daños a muchos tipos de materiales, bien directa o indirectamente. Un alto contenido de SO<sub>x</sub> en el aire produce la aceleración de la corrosión de los metales tales como el acero al carbono, zinc, acero galvanizado, compuestos del cobre, níquel y aluminio.

Esta aceleración se ve favorecida por la presencia de partículas depositadas, por la humedad y por la temperatura.

En general, puede señalarse que la corrosividad de una atmósfera depende de condiciones meteorológicas y factores de contaminación. Se han observado correlaciones entre tasas de corrosión en metales y concentraciones de  $\text{SO}_2$  en la atmósfera, dándose las tasas altas de corrosión más altas en zonas industrializadas. Las nieblas de ácido sulfúrico procedentes de la conversión catalítica del  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$  en la atmósfera, atacan a los materiales de construcción como el mármol, la caliza y la argamasa, convirtiendo los carbonatos en sulfatos solubles en el agua de lluvia.

Esto unido a que el volumen específico de los sulfatos es mayor que el de los carbonatos, hace que en la piedra aparezcan escamas y se debilite mecánicamente. Los compuestos de azufre pueden producir daños en pinturas plásticas, papel, fibras textiles y sobre los contactos eléctricos de los sistemas electrónicos, dando lugar a deficiencias en su funcionamiento.

La acción de los oxidantes fotoquímicos se produce sobre todo en los cauchos en los que causan un rápido envejecimiento y agrietamiento. Los óxidos de nitrógeno decoloran y estropean las fibras textiles y los nitratos producen la corrosión de las aleaciones de cobre - níquel.

### **1.3. Material Particulado Atmosférico**

Dentro de los diferentes contaminantes del aire, las partículas constituyen una de las categorías más amplias. Estas tienen una variedad de formas y tamaños; pueden estar en forma de pequeñas gotas o como polvo seco, con un gran margen de propiedades físicas y químicas.

#### **Aerosoles atmosféricos**

Los aerosoles son suspensiones en el aire u otro medio gaseoso, de partículas microscópicas sólidas o líquidas de tamaño generalmente menor de una micra que, por lo mismo, tienen poca tendencia a caer y asentarse. Mientras que los bioaerosoles son aerosoles que corresponden a partículas de origen natural vivo como pueden ser granos de polen, esporas, bacterias, hongos, etcétera.

#### **Tipos de aerosoles**

**Aerosol urbano:** Los aerosoles urbanos son mezclas de partículas de orígenes diferentes: las emisiones particuladas primarias formadas por industrias, transporte, generación de energía, fuentes naturales y partículas secundarias formadas por conversión de gases a partículas. La distribución de tamaño normalmente es una función de tipo bimodal o trimodal, con dos picos en el rango de partículas finas y uno en el rango de partícula gruesa. Las fuentes de los dos modos de tamaño

son diferentes: las partículas gruesas se generan por procesos mecánicos y consisten en polvo de tierra, cenizas volantes, etc., considerando que los núcleos y partículas de modo de acumulación contienen partículas primarias de las fuentes de la combustión y el material del aerosol secundario como sulfato, nitrato, amoníaco, formados por reacciones químicas que producen la conversión de gases a partículas.

**Aerosoles marinos:** En regiones marinas remotas sin la influencia de fuentes antropogénicas y bajo transporte de aerosol continental, las partículas son principalmente de origen marino. Ellas muestran una distribución de tamaño típicamente trimodal.

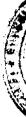
**Aerosoles continentales rurales:** Los aerosoles en áreas rurales son principalmente de origen natural con influencias moderadas de fuentes del antropogénicas.

La masa o concentraciones de volumen son dominadas por partículas gruesas con tamaño de aproximadamente  $7\mu\text{m}$ .

**Aerosol continental remoto:** Los aerosoles continentales remotos muestran una distribución de tamaño bimodal. Las partículas menores a  $2.5\mu\text{m}$  de diámetro representan aproximadamente del 40 al 80% de la masa total del aerosol y consiste principalmente de sulfato, amonio y componentes orgánicos originados del polvo y polen.



CIB-ESP



C

**Aerosoles polares:** Los aerosoles polares son caracterizados por concentraciones de partículas muy bajas. Durante el invierno y primavera se ha encontrado en aerosoles del Artico que han sido influenciados significativamente por fuentes antropogénicas.

Los aerosoles polares son antiguos y a menudo contienen material carbonoso de las fuentes de polución de otras latitudes, sal marina, polvo de las regiones áridas.

**Aerosoles del Desierto:** Los aerosoles del desierto experimentan volúmenes típicamente grandes. La distribución de tamaño es a menudo ancha y tiene tres modos traslapados a  $0.01\mu\text{m}$ ,  $0.05\mu\text{m}$  y  $20\mu\text{m}$ .

#### **1.4. Partículas Primarias y Secundarias**

##### **Partículas Primarias**

Las partículas primarias son aquellas sustancias contaminantes que son vertidas directamente a la atmósfera desde una fuente identificable, se encuentran en la atmósfera en la forma en que se emitieron, es decir mantienen su forma y propiedades físico químicas sin ninguna alteración. Los contaminantes primarios provienen de muy diversas fuentes dando lugar a la llamada contaminación convencional. Su naturaleza física y su composición química es muy variada, si bien podemos agruparlos atendiendo a su peculiaridad más característica tal como su estado físico

(caso de partículas y metales), o elemento químico común (caso de los contaminantes gaseosos).

Entre los contaminantes atmosféricos más frecuentes que causan alteraciones en la atmósfera se encuentran:

- Aerosoles (en los que se incluyen las partículas sedimentables y en suspensión y los humos).
- Óxidos de azufre, SO<sub>x</sub>.
- Monóxido de carbono, CO.
- Óxidos de nitrógeno, NO<sub>x</sub>.
- Hidrocarburos, Hn Cm.
- Ozono, O<sub>3</sub>.
- Anhídrido carbónico, CO<sub>2</sub>.

Además de estas sustancias, en la atmósfera se encuentran una serie de contaminantes que se presentan raramente, pero que pueden producir efectos negativos sobre determinadas zonas por ser su emisión a la atmósfera muy localizada.

Entre otros, se encuentra como más significativos los siguientes:

- Otros derivados del azufre.
- Halógenos y sus derivados.

- Arsénico y sus derivados.
- Componentes orgánicos.
- Partículas de metales pesados y ligeros, como el plomo, mercurio, cobre, zinc.
- Partículas de sustancias minerales, como el amianto y los asbestos.
- Sustancias radiactivas.

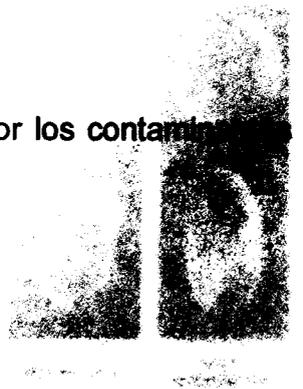
### **Partículas Secundarias**

Las partículas secundarias no se vierten directamente a la atmósfera desde los focos emisores, sino que se producen como consecuencia de las transformaciones y reacciones químicas y fotoquímicas posteriores que sufren los contaminantes primarios en la atmósfera y se incluyen:

- $O_3$
- Otros oxidantes fotoquímicos
- Hidrocarburos oxidados.

Las principales alteraciones atmosféricas producidas por los contaminantes secundarios son:

- La contaminación fotoquímica;
- La acidificación del medio; y
- La disminución del espesor de la capa de ozono.



LOS DIFERENTES

- Arsénico y sus derivados.
- Componentes orgánicos.
- Partículas de metales pesados y ligeros, como el plomo, mercurio, cobre, zinc.
- Partículas de sustancias minerales, como el amianto y los asbestos.
- Sustancias radiactivas.

### **Partículas Secundarias**

Las partículas secundarias no se vierten directamente a la atmósfera desde los focos emisores, sino que se producen como consecuencia de las transformaciones y reacciones químicas y fotoquímicas posteriores que sufren los contaminantes primarios en la atmósfera y se incluyen:

- $O_3$
- Otros oxidantes fotoquímicos
- Hidrocarburos oxidados.

Las principales alteraciones atmosféricas producidas por los contaminantes secundarios son:

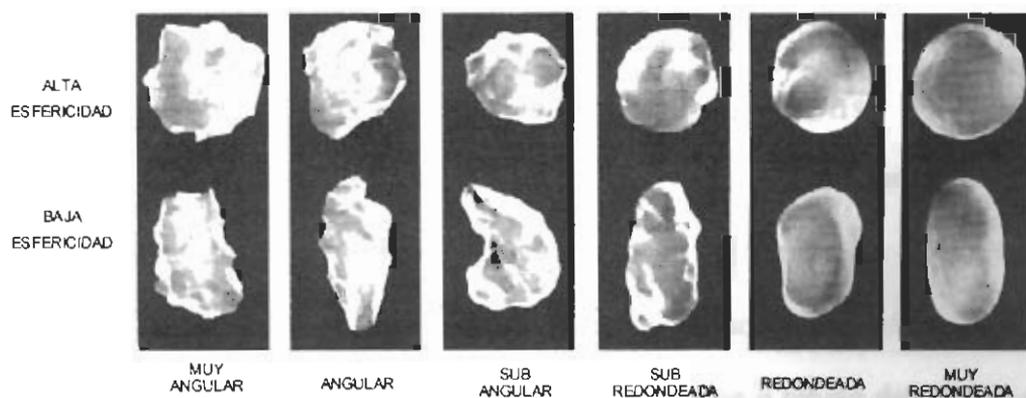
- La contaminación fotoquímica;
- La acidificación del medio; y
- La disminución del espesor de la capa de ozono.

### 1.5. Características de las partículas en función de su tamaño

El material particulado es de tamaño, forma, densidad, estructura y composición variada, para su identificación en cuanto a su tamaño y forma, se han clasificado en términos de diámetro aerodinámico, que se define como el diámetro de una esfera con densidad de  $1 \text{ g/cm}^3$  (densidad unitaria), con la misma velocidad terminal debida a la fuerza gravitacional en aire en calma que la partícula en cuestión, bajo las mismas condiciones de presión, temperatura y humedad relativa.

El diámetro es una propiedad obvia de una partícula esférica, pero no una propiedad tan obvia de una partícula cúbica o semejante a una barra.

Algunas partículas relacionadas con la contaminación del aire se desvían de manera radical de la forma esférica.



**FIGURA 1.3. PARTÍCULAS DE FORMAS DIFERENTES**

Por este motivo cuando se trate de una partícula no esférica, por diámetro se entenderá, el diámetro de una esfera de volumen igual.

Los diámetros de las partículas varían desde decenas de nanómetros hasta cientos de micras y presentan una distribución de masa con respecto a su tamaño bimodal.

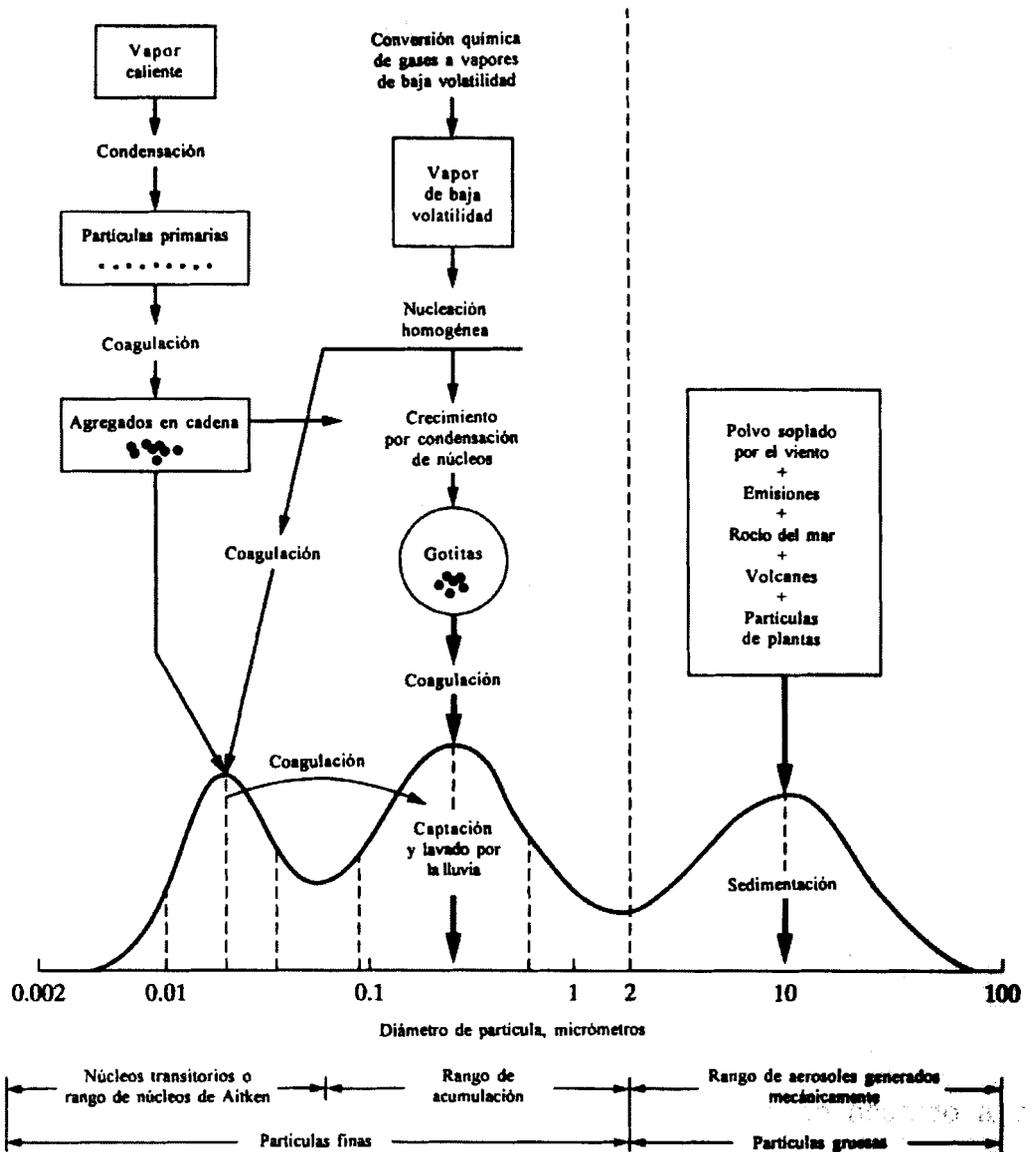
### **Partículas finas y gruesas**

De acuerdo a su diámetro, agrupamos a las partículas en finas y gruesas. Correspondiendo a la categoría de partículas finas a aquellas partículas cuyo diámetro es menor a  $2.5 \mu\text{m}$ . Las partículas finas se dividen a su vez en:

**Partículas de Nucleación ( $< 0,1 \mu\text{m}$ ):** Este grupo comprende principalmente material orgánico volátil y componentes de azufre (sulfato, ácido sulfúrico). Las partículas pueden ser sólidas o gotas.

Este modo es muy sensible a cambios pequeños, por ejemplo las variaciones de temperatura, puede tener consecuencias significativas en el tamaño y concentración del número de partículas. En muchos casos las partículas en el modo de nucleación pueden ser removidas por calentamiento. El tiempo de vida media de estas partículas es generalmente menor a una hora, debido a que rápidamente coagulan con partículas más grandes o sirven de núcleo a gotas de lluvia y neblina.

**Partículas de acumulación (0,1  $\mu\text{m}$  – 2,5  $\mu\text{m}$ ):** Estas partículas son el resultado de la coagulación de pequeñas partículas emitidas por fuentes de combustión, de la condensación de especies volátiles, de la conversión de gas a partículas y de partículas finas de suelos.



**FIGURA 1.4. ESQUEMA DE UNA DISTRIBUCION TIPICA DE PARTICULAS EN LA ATMOSFERA.**

Esta forma de partículas contiene principalmente material sólido aglomerado (carbono elemental, ceniza) y normalmente es estable y reproducible.

**Partículas gruesas (> 2,5  $\mu\text{m}$ ):** Las partículas gruesas son de diámetro mayor a 2,5  $\mu\text{m}$  y están compuestas principalmente de material de re ingreso (material del modo de acumulación, previamente depositado en el sistema de la descarga).

Se producen típicamente por procesos mecánicos, como la resuspensión, abrasión o fricción, son predominantemente de origen natural o geológico, y se agrupan entre éstas las esporas, el polen, suelos, partículas de hojas, polvos generados por el tráfico o producto del desgaste de las llantas y partículas de emisiones industriales como fábricas de cemento y canteras.

En la superficie de estas partículas gruesas pueden adsorberse otras especies contaminantes. La figura 1.4 muestra una distribución típica de partículas que se encuentran presentes en la atmósfera y los diferentes mecanismos de formación.

#### **1.6. Partículas PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>**

El material particulado respirable se ha clasificado de acuerdo a dos tamaños: PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. El primero está compuesto por partículas gruesas en su mayoría de pH básico, producto de la combustión no controlada.

El segundo tamaño, agrupa a partículas generalmente ácidas, que contienen hollín y otros derivados de las emisiones vehiculares e industriales, y corresponde a la fracción más pequeña y agresiva debido a que éstas son respirables en un 100% y por ello se alojan en bronquios, bronquiolos y alvéolos.

Otras sustancias que pueden estar presentes en las partículas son el plomo, arsénico, berilio, cadmio, mercurio, sulfatos, nitratos e hidrocarburos policíclicos aromáticos.

### **Partículas PM<sub>2.5</sub>**

La fracción respirable más pequeña es conocida como PM<sub>2.5</sub> y está constituida por aquellas partículas de diámetro inferior o igual a 2.5 micrómetros, es decir, mucho más pequeñas que las partículas que a veces vemos a la luz del sol. Su tamaño hace que sean 100% respirables, por lo que penetran el aparato respiratorio y se depositan en los alvéolos pulmonares.

Pero además de ser más agresivas para la salud, su tamaño **hace que** también sean más livianas y por eso generalmente **permanecen por más** tiempo en el aire. Ello no sólo prolonga sus efectos, sino que **facilita el que** sean transportadas por el viento a grandes distancias y **formen parte de la** contaminación de distintos lugares.

## **Partículas PM<sub>10</sub>**

La materia particulada del aire representa una mezcla compleja de sustancias orgánicas e inorgánicas típicamente divididas en dos grupos que son partículas gruesas y partículas finas. Entre los términos usados para describir la naturaleza de estas partículas se encuentran: materia particulada en suspensión, partículas en suspensión totales, humo negro, partículas inhalable por el tórax y los PM<sub>10</sub>.

El PM<sub>10</sub> se puede definir como partículas sólidas o líquidas, como polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento o polen dispersas en la atmósfera, cuyo diámetro es inferior a 10 µm.

Actualmente la concentración de PM<sub>10</sub> es empleada como indicador de calidad de aire ambiente, en reemplazo del material particulado en suspensión total que se empleaba anteriormente.

uniform

la cascada

cascada utiliza

recoge partículas del

# **CAPÍTULO 2**

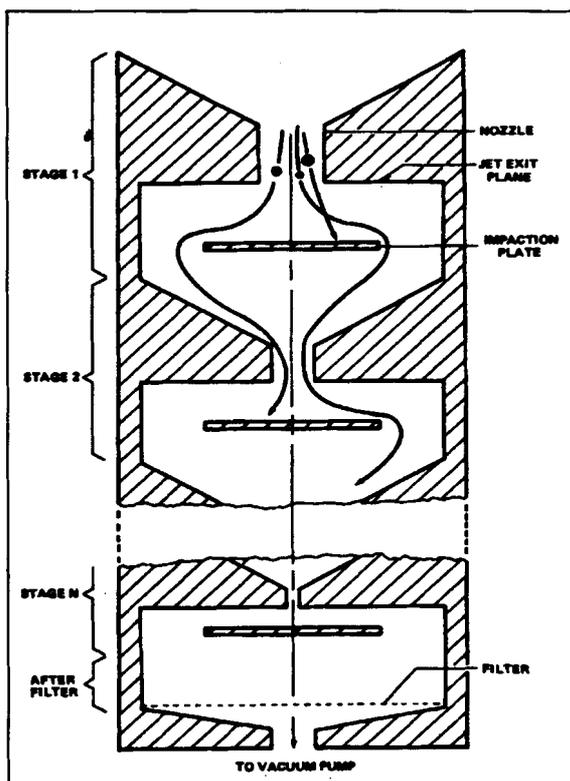
## **2. IMPACTADOR DE CASCADA**

### **2.1. Principio de Funcionamiento**

Los impactadores inerciales son ampliamente utilizados para la selección de tamaño en la colección de partículas de los aerosoles. El impactador de cascada es usado para fraccionar las muestras de partículas y poder obtener la descripción de ellas como función de su tamaño. Un motivo para su uso es que su principio de operación es sencillo.

El principio de funcionamiento del MOUDI (Micro Orifice Uniform Deposit Impactor) es similar al de un impactador de cascada inercial con múltiples boquillas. El impactador de cascada utiliza una bomba de vacío, la cual succiona aire y recoge partículas del medio donde se realiza el muestreo.

Esto ocasiona que una corriente de aire cargada de partículas ingrese a alta velocidad al impactador, dentro del equipo, el chorro de aire con partículas pasa por cada una de las ocho etapas que conforman el MOUDI, en cada etapa existen discos con perforaciones de diversos tamaños que alteran la velocidad del aerosol que continúa hacia la siguiente etapa, esto causa que las partículas cuyo diámetro sea mayor que el diámetro de corte de la etapa, impacten y se depositen, mientras las pequeñas continúan su camino hacia las siguientes etapas siguiendo las líneas de flujo del aire fuera de la región de impactación. El gráfico 2.1 muestra el principio de operación de un impactador de cascada.



**GRÁFICO 2.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN IMPACTADOR DE CASCADA**

Las partículas impactan sobre los substratos de papel de aluminio, los cuales pueden estar cubiertos de silicón para reducir el rebote de las mismas.

Las partículas que son de mayor tamaño que las boquillas son colectadas sobre la lámina de impactación de esa etapa, mientras que las partículas más pequeñas con menor inercia continúan hacia la siguiente etapa donde las boquillas tiene un diámetro menor. El aire se acelera a velocidades más altas en las etapas sucesivas, retirando partículas cada vez más pequeñas en cada etapa subsecuente.

Este proceso continúa a través del impactador de cascada hasta que las partículas menores a  $0.18 \mu\text{m}$  son colectadas en el filtro, el cual es dispuesto en la parte final del impactador.

Las partículas en un impactador de cascada son clasificadas por su diámetro aerodinámico, lo cual es un parámetro importante de tamaño en muchos campos de estudio, incluidos los relacionados con los efectos de las partículas respirables en la salud.

Es fácil coleccionar partículas en un discreto rango de tamaños ~~pasando el~~ aerosol a través de un número de etapas (una etapa consiste de ~~una boquilla~~ y una lámina de impactación) en serie, cada etapa ~~subsecuente colecciona~~ partículas más pequeñas que la etapa anterior.

Finalmente los impactadores pueden clasificar partículas en un amplio rango de tamaños: desde  $0.005\ \mu\text{m}$  y tan grandes como  $50\ \mu\text{m}$ .

Por medio de éste muestreador, un grupo de partículas que cubren un amplio rango de tamaño pueden ser estudiadas en varios rangos más pequeños, donde es posible determinar su concentración como función del tamaño y su composición química elemental mediante absorción química o fluorescencia de rayos-X.

Este equipo típicamente consta de diferentes etapas de impacto, en cada una de las cuales la superficie destinada a éste fin regularmente está cubierta por una capa adhesiva que evita el rebote de las partículas. El diámetro de corte es limitado por el tamaño de la garganta y por la caída de presión permisible a través del impactador.

Es importante indicar que el muestreo en el MOUDI es isocinético, en este tipo de muestreo, la velocidad de la toma de muestra (velocidad y dirección del gas entrando al conducto de toma de muestra) del material particulado en suspensión de una corriente de aerosol es la misma que la de la corriente gaseosa en el punto de muestreo, con esto se garantiza que la velocidad del aerosol se mantiene constante durante todo el muestreo. La anisocinética, o la ausencia de isocinética, puede producir un excesivo o escaso número de partículas de un cierto tamaño.

Una velocidad menor que la velocidad isocinética conducirá a una sobre estimación de partículas de tamaños mayores, y una mayor concentración de masa de material particulado; por otro lado, a una velocidad mayor que la velocidad isocinética conducirá a una sub estimación de las partículas menores con una menor concentración de masa de material particulado.

## 2.2 Descripción y Operación del Equipo (MOUDI)

El parámetro primario que gobierna la colección de partículas en un impactador inercial es el número de Stokes, St, definido como,

$$\text{St} = \frac{\rho_p C V_0 D_p^2}{9\mu W} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$\rho_p$  = densidad de la partícula

C = Factor de corrección

$V_0$  = Velocidad promedio del aire a la salida de la boquilla =  $q/\pi (W/2)^2$

$D_p$  = diámetro de la Partícula

$\mu$  = viscosidad del aire

W = diámetro de la Boquilla

q = Flujo Volumétrico a través de la boquilla

El número de Stokes es un parámetro adimensional que puede usarse para predecir si una partícula impactará en una placa de impactación de una fase o si seguirá los perfiles aerodinámicos fuera de la región de impactación y permanecerá en el aire.

Es práctica común usar  $\sqrt{St}$  como un tamaño de partícula adimensional y para definir  $\sqrt{St_{50}}$  como el valor de  $\sqrt{St}$  correspondiente a  $D_{p50}$ , que es el valor del diámetro de partículas colectadas con el 50 % de eficiencia. Así

$$D_{p50} = \sqrt{\frac{9\mu W}{\rho_p C V_0}} \sqrt{St_{50}}$$

Ecuación 2

DE PARTICULAS  
Y DENSIDAD

La inspección de los términos en la ecuación 2 revelan las alternativas de diseño que pueden emplearse para obtener valores pequeños de  $D_{p50}$ . Por ejemplo,  $\sqrt{St_{50}}$ ,  $\rho_p$  y  $\mu$  son constantes y no pueden variar para disminuir el valor de  $D_{p50}$ .

Para evitar problemas de rebotes de partículas  $V_0$  no puede incrementarse más allá de la velocidad del sonido en una boquilla. Los únicos parámetros restantes en la ecuación 2 son el factor de corrección,  $C$ , y el diámetro de la boquilla,  $W$  los dos pueden ser ajustados para coleccionar partículas pequeñas. Partículas pequeñas pueden ser colectadas si el factor de corrección  $C$  es incrementado.

	Low-density particle	$\rho_p = 1 \text{ gm/cm}^3$ $d_{ps} = 2 \mu\text{m}$	$d_{pa} = 2.0 \mu\text{m}$
	Medium-density particle	$\rho_p = 2 \text{ gm/cm}^3$ $d_{ps} = 2 \mu\text{m}$	$d_{pa} = 2.8 \mu\text{m}$
	High-density particle	$\rho_p = 3 \text{ gm/cm}^3$ $d_{ps} = 2 \mu\text{m}$	$d_{pa} = 3.5 \mu\text{m}$
	Solid sphere	$\rho_p = 2.0 \text{ gm/cm}^3$ $d_{ps} = 1.4 \mu\text{m}$	$d_{pa} = 2 \mu\text{m}$
	Hollow sphere	$\rho_p = 0.5 \text{ gm/cm}^3$ $d_{ps} = 2.8 \mu\text{m}$	
	Irregular shape	$\rho_p = 2.4 \text{ gm/cm}^3$ $d_{ps} = 1.3 \mu\text{m}$	

Note:  $\rho_p$  = Particle density  
 $d_{ps}$  = Stokes particle diameter  
 $d_{pa}$  = Aerodynamic diameter

**FIGURA 2.1. DIÁMETROS AERODINÁMICOS DE PARTICULAS SEGÚN SU DIÁMETRO DE STOKES, FORMA Y DENSIDAD**

El método utilizado por el MOUDI para coleccionar partículas, es emplear boquillas muy pequeñas. Las dimensiones de las boquillas permiten a las partículas ser coleccionadas a velocidades relativamente bajas, y consecuentemente con bajas caídas de presión. Debido al uso de múltiples boquillas con micro orificios (900 boquillas de 90  $\mu\text{m}$  de diámetro en la fase final), el tamaño de corte de la fase final puede ser tan pequeño como 0.18  $\mu\text{m}$  con una razón de flujo total a través del impactador de 30 L/min.

Diámetros aerodinámicos de corte para

La tabla 1 muestra el diseño y los parámetros operativos para la entrada y las ocho fases del impactador. El número de boquillas varía desde 1 para la entrada a 900 para las últimas fases.

Todas las boquillas de las ocho etapas son perforadas mediante el uso de brocas especiales. Al diseñar los impactadores de cascada, es preferible tener valores de la relación entre la distancia del chorro de aire a la placa (S) y el diámetro de la boquilla (W) de por lo menos 1/2 y números de Reynolds de flujo de aire en las boquillas de 500 a 3000.

Los valores de S/W y el número de Reynolds de las boquillas en el MOUDI se encuentran cercanos a estos valores.

El valor de S/W en las etapas finales es elevado como consecuencia de los pequeños diámetros de las boquillas y la necesidad de que exista una separación suficiente que permita al aire fluir hacia fuera de la región de impactación.

El equipo que se utilizó para realizar el muestreo es un MOUDI fabricado por MSP Corporation, modelo 100, trabaja con una razón de flujo de 30 litros / minuto, las condiciones atmosféricas para una mejor operación son entre 10 y 40 °C y a una humedad relativa entre el 20 al 80 %.

El equipo consta de ocho etapas, los diámetros aerodinámicos de corte para las etapas se extienden desde 18  $\mu\text{m}$  a 0,18  $\mu\text{m}$ . El detalle de los tamaños para cada una de las etapas que conforman el MOUDI se detallan a continuación:

**TABLA 1**  
**DISEÑO Y PARÁMETROS DE OPERACIÓN**  
**DEL MOUDI MSP MODELO 100**

Etapa	Diámetro de corte <sup>a</sup> Nominal ( $\mu\text{m}$ )	Número de boquillas	S / W <sup>b</sup>	P / P <sub>0</sub> <sup>c</sup>	Número de Reynolds
Entrada	18	1	0.75	1.00	2420
1	10.0	3	0.5	1.00	1560
2	5.6	10	1.0	1.00	1090
3	3.2	10	1.0	1.00	1680
4	1.8	20	1.0	1.00	1510
5	1.00	40	1.0	0.99	1440
6	0.56	80	1.5	0.97	1340
7	0.32	900	4.1	0.95	350
8	0.18	900	6.4	0.89	580

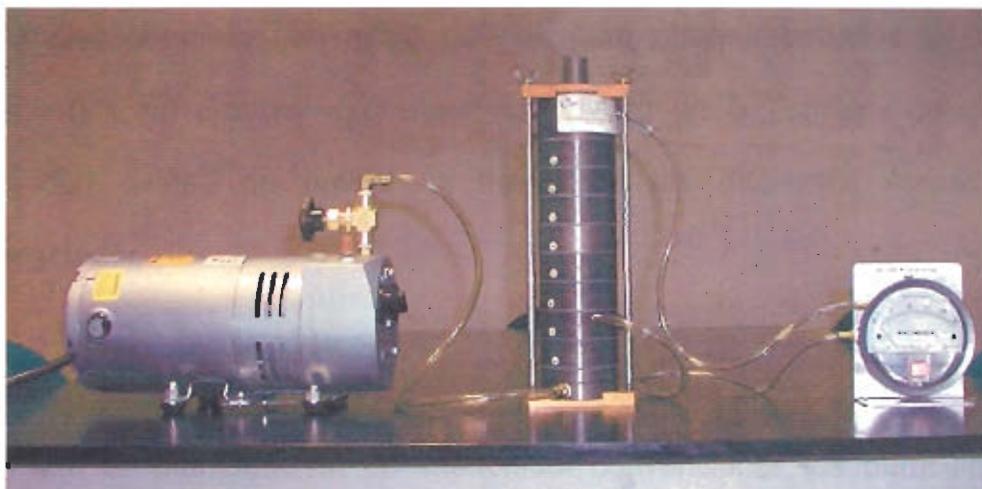
<sup>a</sup> Con un caudal de 30 L/min y con presión atmosférica y temperatura estándar.

<sup>b</sup>S = Distancia del chorro a la placa; W = diámetro de la boquilla.

<sup>c</sup>P = Presión absoluta en la etapa de salida con todas las etapas instaladas.

P<sub>0</sub> = Presión al ingreso del MOUDI.

Los valores que relacionan la presión absoluta a la salida de cada etapa con respecto a la presión de ingreso del impactador son mostrados en la tabla 1. Estos valores van desde 1.00 para la entrada y las primeras cuatro etapas a 0.89 a la salida de la etapa 8.



**FIGURA 2.2. IMPACTADOR DE CASCADA MSP 100**

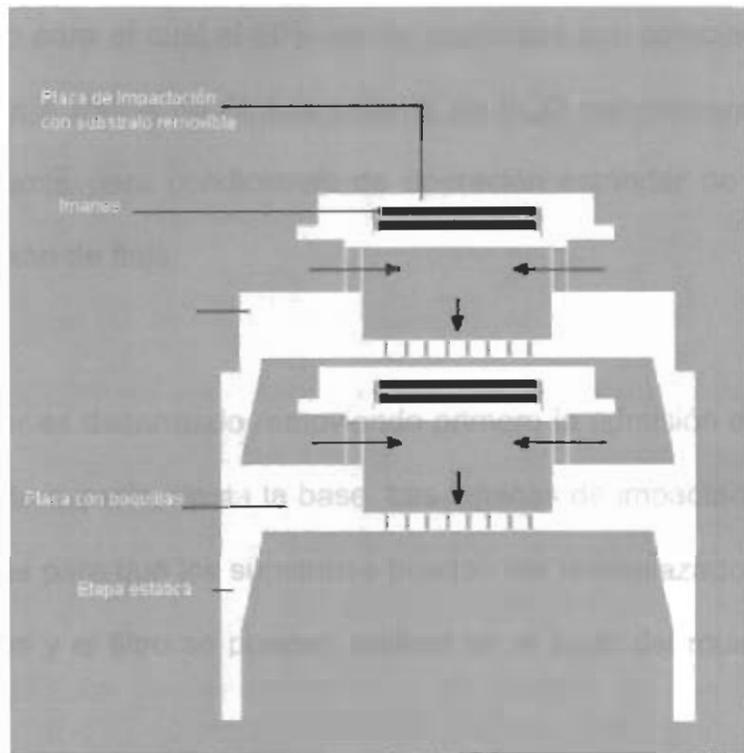
El MOUDI contiene algunas características únicas que no serán encontradas en otros impactadores de cascada. Estas características contribuyen a una total versatilidad del instrumento para el muestreo de partículas aerotransportadas, que incluye:

- Uso de cubiertas protectoras para las láminas de impactación, así como de los filtros. Las cubiertas previenen la contaminación del depósito, protegiendo las muestras para el posterior análisis físico – químico, logrando que las láminas y los filtros sean transportados desde el lugar de muestreo sin contaminación.
- Las cubiertas disminuyen pérdidas durante el almacenaje de las muestras. Además, evita la reacción química del material particulado con gases que se encuentran en el ambiente.

- Múltiples boquillas con micro orificios para obtener tamaños de corte pequeños sin producir excesivas velocidades en la corriente de aire o grandes caídas de presión a través de las diferentes etapas del impactador.
- Aunque hay un número grande de boquillas, el área de impacto es de sólo 2.7 cm de diámetro. En un impactador convencional, las partículas se depositan en montones de tierra debajo de cada boquilla, en un MOUDI, los anillos se superponen, formando un depósito uniforme en la placa de impactación.
- Láminas de impactación y filtros intercambiables, tanto los substratos de impactación como los filtros pueden ser cargados y descargados en el laboratorio, disminuyendo el riesgo de que se modifique la cantidad de partículas depositadas durante el retiro de los substratos luego del muestreo.
- Dispositivos magnetizados que ayudan a mantener fijos y en posición vertical a los substratos de las diferentes etapas.

Cada etapa del impactador consta de un cuerpo, la lámina de **impactación** va en la parte superior, mientras que la placa que contiene **las boquillas** se coloca en la parte inferior.

La placa de impactación se sostiene al cuerpo de la etapa por medio de dos imanes: el primero se encuentra en la parte superior del cuerpo y el segundo en la parte posterior de la placa de impactación.



**GRÁFICO 2.2. ESQUEMA DE UNA ETAPA DE UN IMPACTADOR DE CASCADA**

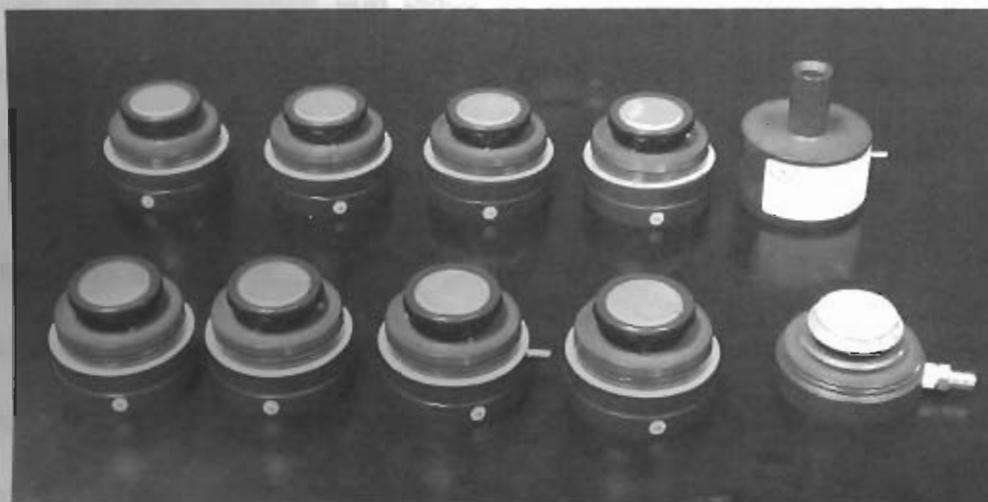
En el gráfico 2.2 se muestra un diagrama de una etapa de un impactador de cascada. Es importante recordar lo que significa "etapa de impactador". Como lo muestra el gráfico 2.2 esta incluye la sección de boquillas y la lámina de impactación. Las partículas pueden ser recogidas directamente en las láminas de impactación o en un papel de aluminio, filtro o un sustrato plástico colocado en el soporte.

Los impactadores de cascada tienen separaciones aerodinámicas debido a que normalmente los tamaños de calibración se expresan en términos del diámetro aerodinámico. Cada etapa se encuentra caracterizada por el diámetro de corte efectivo (ECD o  $D_{50}$ ), el ECD representa el diámetro aerodinámico para el cual el 50% de las partículas son colectadas y el 50% restante pasa a través de él. Los valores de ECD normalmente son dados por el fabricante para condiciones de operación estándar de temperatura, presión, y razón de flujo.

Todas las

Una etapa

El impactador es desarmado removiendo primero la admisión de cada etapa desde la parte superior hasta la base. Las láminas de impactación necesitan ser removidas para que los substratos puedan ser reemplazados. El retiro de los substratos y el filtro se pueden realizar en el lugar del muestreo o en el laboratorio.



**FIGURA 2.3. PARTES DE UN IMPACTADOR DE CASCADA MSP 100**

Si es necesario, las placas que contiene las boquillas pueden ser retiradas, sacando los tres tornillos que la sujetan al cuerpo y presionando sobre la placa de las boquillas a través de los hoyos de los tornillos. Nunca se debe presionar directamente sobre el centro de la placa de boquillas. Esta parte de la placa es fina y puede resultar fácilmente dañada. La figura 2.3 muestra un MOUDI parcialmente desarmado. Se presentan las ocho etapas, la etapa de admisión y el filtro.

Todas las etapas tienen en la parte superior los substratos de impactación. Una etapa consta de una base, un anillo que sujeta al substrato, y el substrato. El contenedor del filtro está compuesto por una base y un anillo que mantiene sujeto el filtro a la base.

Aunque el MOUDI es considerado un impactador de cascada de ocho etapas, se puede colocar una placa de impactación encima de la primera fase. Esta placa junto con la etapa de admisión del aerosol conforman una novena fase.

### **Substratos de impactación**

Una variedad de substratos de impactación pueden usarse con el MOUDI. La única condición es mantener una distancia apropiada entre las boquillas y la placa de impactación y tener una superficie de colección lo suficientemente grande para coleccionar la muestra entera. El tipo de substrato requerido en el

MOUDI es principalmente dictaminado por el aerosol a ser colectado y el método por el cual las muestras serán analizadas.

Si el impactador colectará partículas sólidas es probable que estas reboten. El rebote de la partícula ocurre cuando una partícula golpea y rebota de un sustrato de impactación sin adherirse a él.

Para reducir el rebote de partículas se suele cubrir los sustratos con un silicón o grasa ligera para formar una superficie pegajosa. Antes de iniciar el pesaje inicial del sustrato, el solvente debe haberse evaporado por completo de los sustratos, por lo que será necesario colocarlos dentro de un horno. Por otro lado si las partículas muestreadas contienen un alto grado de humedad, entonces el rebote de las partículas no será un problema.

Si se usa silicón en la placa de impactación del MOUDI, es posible colectar una cantidad importante de partículas sólidas en cada fase sin cargar excesivamente los sustratos.

Casi cualquier tipo de sustrato puede ser utilizado en el impactador. El único requisito es que sea flexible y de poco espesor. El MOUDI fue diseñado y calibrado para un sustrato con 0.001 pulgadas de espesor. **Entre los materiales que se utilizan para sustratos tenemos: papel de aluminio, teflón, PVC, filtros de película plástica.**

El material del sustrato también dependerá de la técnica usada para analizar la muestra. Si lo que se va a realizar es un análisis de fluorescencia de rayos X, entonces los sustratos deben ser químicamente limpios, debe usarse un material de bajo peso atómico como el Teflón.

Si los depósitos son pesados para determinar la distribución de masa por tamaño, entonces cualquier sustrato con un peso de tara estable y baja masa puede usarse.

Es importante que el peso del material viscoso aplicado sobre los sustratos sea estable, por lo que es esencial que todo el solvente se haya evaporado antes de realizar el pesaje de los sustratos. Materiales como papel de aluminio, Teflón, Mylar o policarbonato trabajan bien.

Algunos materiales absorben con más facilidad la humedad del medio que los rodea; así, el peso de la tara estará en función de la humedad a la que los sustratos han sido expuestos y este material no sería conveniente para una medida de distribución de masa.

### **Ensamblaje e Instalación del sustrato.**

Las etapas deben ser ensambladas en orden inverso, la que tiene las boquillas más pequeñas en la base y la que posee las boquillas de mayor diámetro en la parte superior.

El diámetro de las boquillas se encuentra grabado dentro de las láminas y puede ser leído mirando debajo de la etapa. Las etapas se encuentran también numeradas en la superficie externa. Finalmente, se debe colocar la cubierta en la parte superior del MOUDI. Las mangueras que unen el manómetro con el equipo así como la manguera que conecta a la bomba de vacío con el MOUDI deben estar colocadas de una manera tal que se evite la obstrucción de las mismas.

### **Mantenimiento**

El mantenimiento es importante, ya que sólo a través de un adecuado procedimiento para la conservación y el cuidado de todos los sistemas de muestreo, éste será confiable para operar satisfactoriamente y por períodos de tiempo prolongados. A continuación se detallan algunas medidas a ser consideradas para el correcto desempeño del equipo:

Las boquillas de las etapas finales son bastante pequeñas ( $0.32\ \mu\text{m}$  y  $0.18\ \mu\text{m}$  de diámetro) y pueden ser parcialmente obstruidas debido a la deposición de las partículas.

Cuando esto ocurra la caída de presión a través de las placas que contienen las boquillas aumentará mientras el flujo permanece constante, esto indica que las boquillas en las etapas finales están empezando a llenarse de suciedad y es momento de limpiarlas.

Cada cierto tiempo se debe aplicar una cantidad de grasa en los O-rings ubicados entre las etapas del MOUDI.

El correcto procedimiento de limpieza consiste en retirar las partículas que se encuentran en exceso en la parte externa del equipo, posteriormente se procede a remover la sección donde se encuentran las boquillas y utilizando un cepillo limpio y seco se retira el material particulado que se encuentra sobre esta pieza.

Debe cepillarse cualquier partícula que se encuentre en la etapa de admisión, lugar por donde ingresa la muestra al impactador, es importante la limpieza de esta sección ya que no pueden quedar restos de anteriores muestreos en el equipo, porque estos afectarían los resultados de las mediciones. Es importante que los cepillos a usar sean limpiados previamente por medio de un enjuague de acetona y secados antes de usarse para retirar el material particulado.

Para retirar cualquier partícula restante se procede a enjuagar las diferentes etapas que conforman el impactador en agua que contenga ligeramente detergente o cualquier otro solvente para limpieza.

Posteriormente se debe enjuagar las partes con agua **destilada y alcohol**. Nunca se debe realizar la limpieza con un baño ultrasónico.

Periódicamente (cada 5 o 20 mediciones, dependiendo de la fuente) las partes del impactador deben ser limpiadas con un solvente apropiado, puede ser alcohol etílico, acetona, o tolueno. Finalmente, se vuelve a lavar con jabón y agua. Se debe evitar el contacto de estos líquidos de limpieza con los o-rings.

El cuerpo del impactador, placas, etapas, etc, deberán ser secados con un paño limpio o un pañuelo de papel limpio esto ayudará a retirar cualquier resto de suciedad o partículas. Antes de realizar un nuevo muestreo, todas las partes del impactador deberán ser limpiadas con aire comprimido.

### **2.3. Calibración del Impactador de Cascada**

Debido al amplio rango de tamaños de corte en las diferentes etapas del MOUDI es necesario aplicar tres técnicas para la calibración del mismo. Para el rango de 0.03 a 0.7  $\mu\text{m}$  se utiliza un analizador diferencial de movilidad, en el rango de tamaño de 0.7 a 1.3  $\mu\text{m}$  látex de poli estireno (PSL), y un generador de aerosol monodisperso de orificio por vibración (VOMAG) para el rango del tamaño de 1.3 a 20  $\mu\text{m}$ .

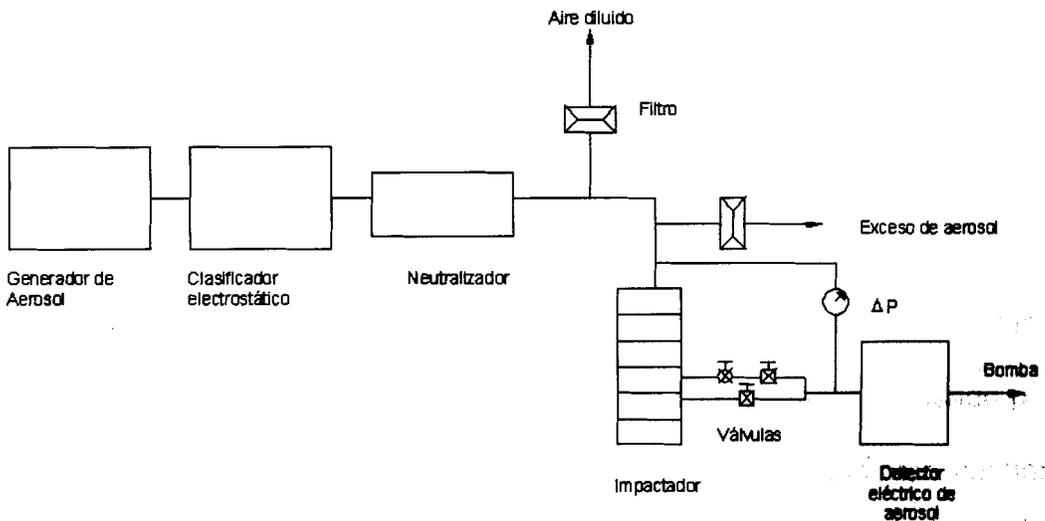
#### **Calibración en el rango 0.03 – 0.7 $\mu\text{m}$**

El diagrama esquemático del sistema de prueba usado para el rango 0.03 - 0.7  $\mu\text{m}$  se muestra en el gráfico 2.3. El sistema consiste de un

generador de aerosol, un clasificador electrostático, una carga neutralizadora radiactiva Kr - 85, la fase del MOUDI a calibrarse y un detector eléctrico de aerosol (EAD, modelo 3070, TSI). La concentración de aerosol en una fase del impactador son determinados con el EAD.

Los aerosoles son generados utilizando un proceso en el cual se involucra la atomización de una solución (DOS) con un atomizador de colisión. La segunda etapa del proceso involucra el paso del aerosol a través de un clasificador electrostático para obtener un aerosol de prueba con una distribución de tamaño estrecha y una desviación geométrica standard  $< 1.05$ .

El tamaño de partículas que se obtiene cambiando la razón del flujo del aire y el voltaje del clasificador electrostático es variado.



**GRÁFICO 2.3. ESQUEMA DE CALIBRACIÓN DE UN IMPACTADOR DE CASCADA**

La incertidumbre en el tamaño de partículas resultante es  $\leq \pm 5\%$ . El porcentaje de penetración del aerosol a través de cada fase del impactador es medido haciendo pasar el aerosol a través del impactador y midiendo la concentración del aerosol con el EAD.

La concentración del aerosol en la fase del impactador es medida desviando todo este flujo en el EAD. La válvula de la aguja es usada para simular la caída de presión a través de la fase del impactador. La concentración de aerosol es corregida para considerar las pérdidas de partículas en la válvula, en la mayoría de los casos, es  $\leq 2\%$ .

### **Calibración en el rango 0.7 – 1.3 $\mu\text{m}$**

Partículas monodispersas PSL se usan para la calibración en el rango de tamaño de partículas 0.7 - 1.3  $\mu\text{m}$ . Se siguen dos pasos para generar el aerosol: atomización seguida de clasificación electrostática. Las partículas PSL de un tamaño específico, suspendidas en una solución acuosa diluida, son atomizadas con un atomizador de colisión.

La solución atomizada pasa a través de un secador de gel de sílice, dejando las partículas PSL secas. Luego, un clasificador electrostático es usado para extraer las partículas PSL primarias del aerosol, el cual también contiene partículas residuales y dos o más partículas de PSL. Este aerosol clasificado es diluido y se lo hace pasar a través de la fase del impactador a calibrar.

Las concentraciones de partícula se miden con un contador láser de partículas.

### **Calibración en el rango 1.3 – 20 $\mu\text{m}$**

Un generador de aerosol monodisperso de orificio por vibración (VOMAG, modelo 3050, TSI, Inc.) es usado para generar aerosoles líquidos y sólidos.

La cantidad de las partículas depositadas en las diferentes superficies dentro del impactador es determinada por análisis fluorométrico.

Para cada punto de calibración, se generaron partículas de un tamaño deseado con el VOMAG y se hicieron pasar a través del impactador.

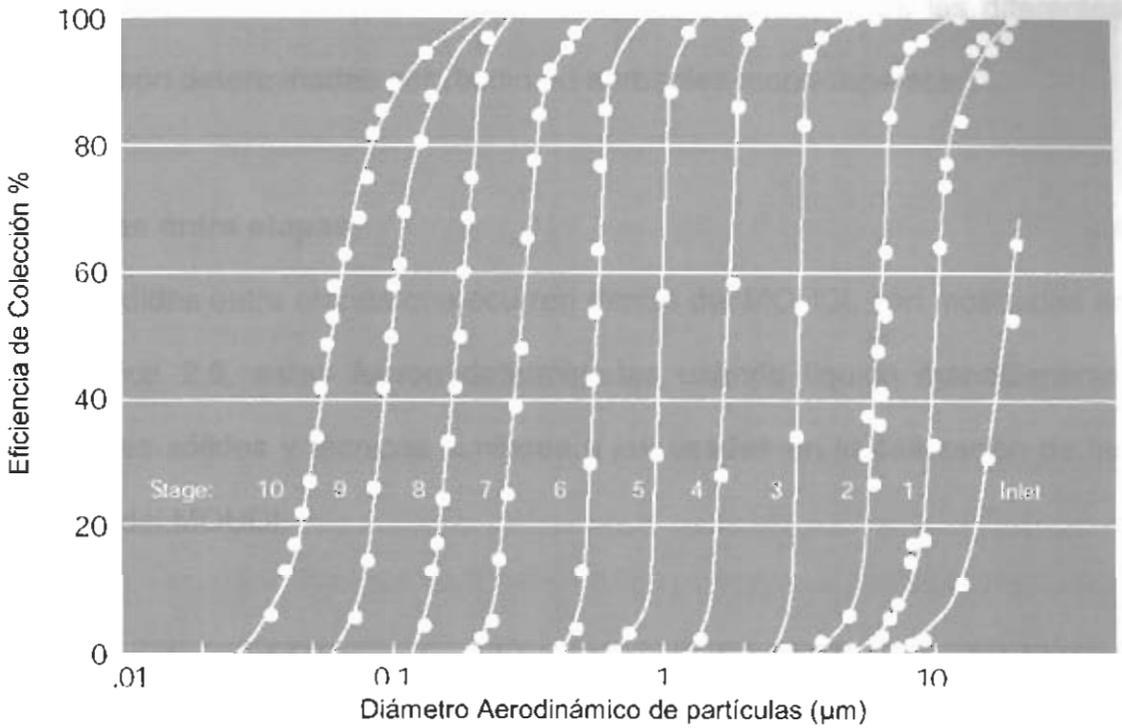
Después de un tiempo de 5 a 30 minutos, la lámina de impactación y el filtro colocados en la fase del impactador son retirados y lavados en 20 ml de una solución acuosa de hidróxido de sodio al 0.001 N para el caso de partículas sólidas.

Las cantidades de tinte en la solución del lavado son medidas con un fluorometro (Aminico modelo J4-7439 American Instrument Co.).

La eficiencia de colección de partículas de la fase del impactador es igual a las cantidades colectadas en la lámina de impactación y el filtro.

**Eficiencia de colección.**

Las curvas de eficiencia de colección resultantes para cada fase del MOUDI se muestran en la Gráfico 2.4.



**GRÁFICO 2.4. CURVAS DE EFICIENCIA COLECCIÓN DE PARTÍCULAS**

Los substratos de impactación fueron láminas de papel de aluminio con una capa de aceite de silicón para lograr una mejor colección de partículas.

Las curvas corresponden a los tamaños de corte nominal mostrados en la tabla 1. Los valores de los puntos de corte en la Gráfico 2.4 corresponden a los valores de calibración de la misma tabla.

En general, los valores de calibración del MOUDI están dentro del 3% de los valores nominales, lo cual está dentro de la exactitud experimental de la calibración. Las características de las partículas de corte (curvas de eficiencia de colección) de cada etapa y las pérdidas entre las diferentes etapas son determinadas por medio de aerosoles monodispersos.

### Pérdidas entre etapas

Las pérdidas entre etapas que ocurren dentro del MOUDI, son mostradas en el Gráfico 2.5, estas fueron determinadas usando líquido monodisperso, aerosoles sólidos y técnicas similares a las usadas en la calibración de las etapas del MOUDI.

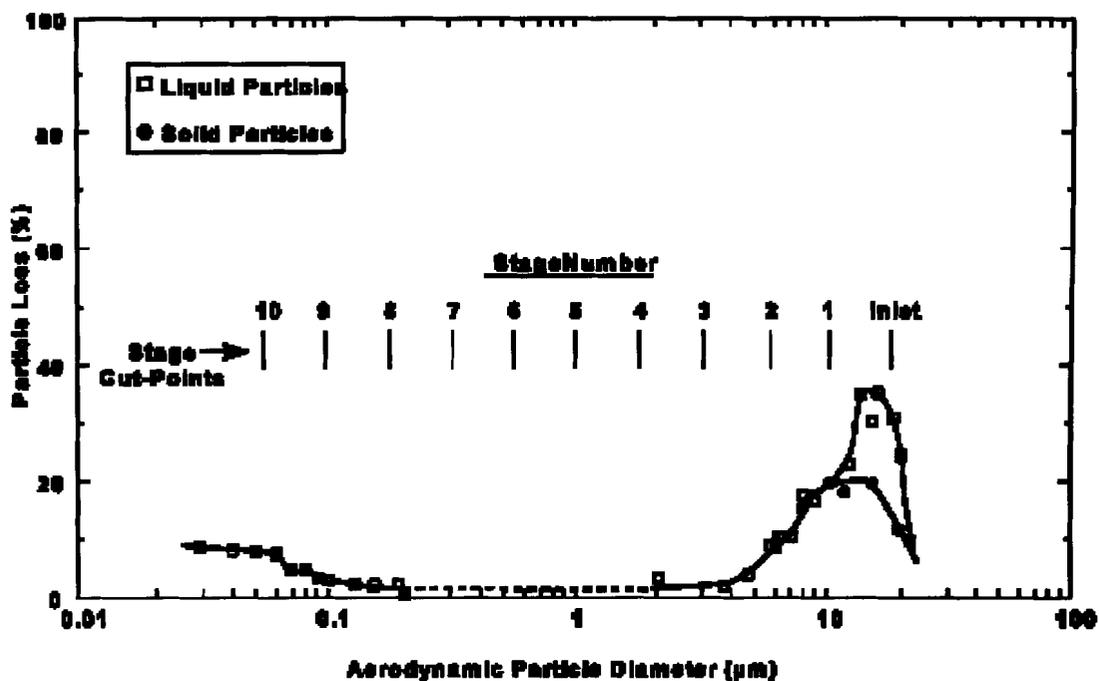


GRÁFICO 2.5. PERDIDAS EN EL IMPACTADOR DE CASCADA

Un aceite de silicón se aplicó al substrato de impactación cuando se trabajó con partículas sólidas. Las pérdidas entre etapas mostradas en el Gráfico 2.5 son tanto para líquidos como para partículas sólidas. Como se puede apreciar las pérdidas para las partículas sólidas son menores que las partículas líquidas debido al efecto de rebote de las partículas sólidas.

Las pérdidas son mayores para las partículas más grandes (35% para partículas líquidas y 20% para partículas sólidas mayores a 15  $\mu\text{m}$  de diámetro), donde los efectos inerciales son más severos. Sin embargo, las pérdidas disminuyeron rápidamente conforme el tamaño de las partículas disminuía con pérdidas menores al 2% entre las etapas 3 y 8.

# **CAPÍTULO 3**

## **3. MÉTODOS EXPERIMENTALES**

### **3.1. Protocolo Para Muestreo De Partículas Usando El Impactador De Cascada.**

#### **Criterios para Selección de Lugares para las Mediciones**

Lo primero en el diseño y la implementación de cualquier sistema de monitoreo es definir todos los objetivos que se pretenden y derivar de estos los requerimientos de datos que se necesitan para llevarlos a cabo.

Entre los objetivos más usuales tenemos los siguientes:

- Establecer bases científicas para políticas de desarrollo.
- Determinar la congruencia con las normas y los criterios legales.

- Estimar los efectos en la población y en el ambiente.
- Informar al público acerca de la calidad del aire.
- Proporcionar información de fuentes y riesgos de contaminación.
- Llevar a cabo evaluaciones de tendencias a largo plazo.
- Medir los efectos de las medidas de control en la calidad del aire.
- Estudiar las reacciones químicas de los contaminantes en la atmósfera.
- Calibrar y evaluar modelos de dispersión de contaminantes en la atmósfera.

Se debe considerar que cuando se desarrolla un programa de monitoreo usualmente se contemplan diferentes objetivos, por este motivo se deben conciliar y ponderar los objetivos que se pretendan cubrir en orden de importancia.

También se tendrá que tomar en cuenta el área de influencia, ya que todos estos objetivos de monitoreo determinarán áreas o localidades delimitadas en donde se llevarán a cabo los estudios, agrupándose en:

- Muestreos de un área o región determinada.
- Muestreos de la contaminación causada por fuentes emisoras:
  - Fijas
  - Móviles
- Muestreos específicos, generalmente relacionados con personas.

Los muestreos relacionados con un área o región, son aquellos que se enfocan principalmente a establecer el nivel de contaminación de una o varias localidades, lo cual nos permite conocer la exposición de la población, vegetación, materiales y propiedades de la misma. Sirven para dar información de la calidad del aire de la región determinada y así poder evaluar sus tendencias o correlacionar estos datos con otros estudios. Para la selección de los puntos o sitios de muestreo se debe considerar:

- Ubicación de zonas de alta emisión de contaminantes particulados
- Identificación de aquellos procesos que generan emisiones significativas de partículas al aire (inventario)
- Las condiciones meteorológicas
- El nivel del terreno (Topografía )
- La disponibilidad de espacio físico para la ubicación de los equipos.

### **Definición del Número y los Sitios de Muestreo**

Una vez definidos los objetivos del muestreo, delimitadas las áreas de estudio y los parámetros que se necesitan muestrear se tomará como meta la organización y distribución de los puntos de colección de muestras dentro del área de estudio, de manera que sean representativos de la calidad del aire de un lugar determinado, por lo que el siguiente paso será definir la localización y determinación del número de sitios de muestreo que se requieran para cumplir con los objetivos.

---

### **Localización de los Sitios de Muestreo**

Para elegir los sitios de muestreo se deberán de tomar en cuenta una variedad de consideraciones como tipo de emisiones, fuentes de emisión, los factores topográficos y meteorológicos, información de la calidad del aire, en caso de que exista, modelos de simulación y otros factores como uso de suelo, demografía, salud pública, etc. A continuación se describen cada uno de ellos.

**Factores Topográficos y Meteorológicos:** Estos factores junto con los datos de las emisiones y con modelos de dispersión pueden utilizarse para dar una estimación inicial de las concentraciones de contaminantes e identificar posibles zonas críticas.

**Información de la Calidad del Aire:** Es recomendable un estudio de reconocimiento para identificar los problemas de contaminación en el área.

**Modelos de Simulación:** Los resultados de los modelos de simulación, pueden ser usados para predecir los patrones de depósito o de dispersión de los contaminantes, así como las reacciones atmosféricas probables.

Estos modelos son necesarios cuando se planea la instalación de alguna industria o cuando es imposible el muestreo de algún contaminante en particular.

**Otros factores:** Entre estos se incluyen la información sobre uso de suelo, demografía y salud pública.

Sirven para identificar efectos probables, particularmente impactos en la salud, resultado de la exposición a los principales contaminantes atmosféricos y número probable de personas que pudieran estar expuestos.

### **Requerimientos del sitio de muestreo**

Se deberá tomar en cuenta, al seleccionar la ubicación de los sitios de muestreo, algunas consideraciones prácticas que necesitan tener estos sitios, como son las siguientes:

- Fácil acceso
- Seguridad
- Infraestructura
- Libre de obstáculos.

Se requiere que el sitio tenga fácil acceso debido a que se tendrán que realizar traslados al mismo para recolectar muestras, inspecciones, etc. Pero a su vez deberá estar protegido de posibles actos de vandalismo u otros que alteren la toma de muestras.

Se recomienda que el sitio cuente con los servicios básicos necesarios.

Como las mediciones se llevarán a cabo en lugares donde la calidad del aire es representativa de la zona que está sujeta a investigación, no podrán haber obstáculos que afecten el movimiento del aire en el sitio, ni fuentes de emisión que puedan invalidar las muestras por el arrastre a la toma del muestreador de las emisiones de alguna fuente. Es decir, el movimiento del aire alrededor de la entrada de la toma de muestra deberá estar libre de restricciones que afecten el flujo del aire en las cercanías del muestreador.



CIB-ESI

Algunas de las recomendaciones que se fijan en los manuales de los diferentes organismos de control, se presentan a continuación:

- El sitio se seleccionará cuidando que exista un flujo de aire lo más libre posible, se debe evitar en lo posible, árboles y edificios alrededor del sitio de muestreo y no tomar muestras en las superficies laterales de los edificios.
- La entrada al muestreador debe estar entre 1.5 y 4 m. sobre el nivel del piso. Una altura de 1.5 m. sirve para estimar exposiciones potenciales del ser humano. Sin embargo, para evitar el vandalismo en algunos sitios de muestreo, es preferible instalar la toma de muestra a 2.5 m.
- Para medir los parámetros meteorológicos se recomienda instalar los instrumentos a una altura mínima de 10 m. sobre el nivel del suelo.



CIB-ESPOL



CIB

- En lo posible, deben rechazarse las interferencias en el equipo de muestreo, por la circulación local que depende de factores topográficos.
- Para minimizar los efectos de las fuentes locales, se recomienda instalar el equipo de muestreo a una distancia de por lo menos 20 metros de cualquier otra fuente industrial, doméstica o de carreteras con alto tráfico vehicular. Es recomendable instalar una cubierta contra lluvia para evitar efectos por condiciones climáticas

Criterios adicionales para la ubicación de las tomas de muestra requeridas para llevar a cabo muestreos de calidad de aire se presentan en el CFR 40 norteamericano, el cual presenta un resumen de estos criterios en función del contaminante y la escala espacial en la que se llevará a cabo el muestreo.

### **Sitios Seleccionados**

Para el muestreo se propusieron como sitios de medición tres puntos, en los cuales se procesan diferentes tipos de material y adicionalmente existe personal que labora en estos sitios y que es la población expuesta a las partículas que emiten estos procesos, en el punto uno se procesa caliza y limolita, en el punto dos arcilla y en el punto tres se tritura yeso. En cada una de las estaciones se realizaron 3 mediciones, correspondientes a dos días laborables (generalmente lunes, miércoles y viernes) y un día no laborable (Domingo).

**TABLA 2**  
**CALENDARIO DE MEDICIONES**

Estación	Lugar de muestreo	Material	Fecha de Medición		
			1	2	3 *
1	Trituradora de Yeso	Yeso	15/05/2002	31/05/2002	07/06/2002
2	Trituradora de Arcilla	Arcilla	10/06/2002	14/06/2002	21/06/2002
3	Trituradora de Caliza	Caliza	24/06/2002	28/06/2002	04/07/2002

\* Días sin producción

**Determinación de Tiempos de Muestreo: Duración del Programa, Frecuencia de Muestreos y Tiempo de Toma de Muestra**

La determinación de los tiempos de muestreo dependerá del tipo de programa que se pretenda llevar a cabo. Lo primero que se tendrá que definir para cualquier tipo de programa de muestreo, será la duración del mismo. La frecuencia de muestreo y el tiempo de toma de muestra, se determinarán para programas discontinuos en función de los objetivos de muestreo y de la calidad de los datos que se requiera para cumplir con estos objetivos.

**Duración del Programa:** se define como el período de tiempo de evaluación en que se llevan a cabo las mediciones para recopilar la base de datos necesaria para cumplir con los objetivos del programa.

Para la realización de este estudio, el programa de muestreo tuvo una duración de 51 días, el período de mediciones arrancó el 15 de mayo de 2002 y finalizó el 4 de julio del mismo año.

**Frecuencia:** el término frecuencia de muestreo indica el número de muestras que se tomarán o llevarán a cabo en un intervalo de tiempo, en un punto de muestreo o en un área de muestreo, y se aplica en programas de muestreo discontinuos. Este factor es de gran importancia puesto que los valores de calidad del aire dependen en gran parte de variaciones temporales: condiciones climáticas y cambios estacionales.

Estas concentraciones también varían en función del día de la semana y en un mismo día las condiciones meteorológicas y patrones de emisión, pueden producir variaciones en las concentraciones de los contaminantes. Para establecer valores medios anuales es recomendable realizar muestreos individuales con una frecuencia de 1 a 2 veces por semana dependiendo de las concentraciones y variando el día de la semana, de manera que se tomen muestras en todos los días de la semana.

Para promedios diarios por lo menos 5 mediciones por mes, durante un año o por lo menos durante seis meses, cuando no hayan cambios estacionales muy marcados. En este caso en particular, se tomó una frecuencia de muestreo de tres días, de los cuales dos eran laborables y uno no laborable,

esto con la finalidad de contrastar los niveles de contaminación con producción y sin producción.

**Tiempo de Toma de muestra:** el tiempo de toma de muestra de una lectura individual en mediciones discontinuas, corresponde al período de tiempo en que se lleva a cabo la determinación de concentraciones de los contaminantes mientras más corto es el tiempo de toma de muestra, más altos serán los valores máximos esperados.

Este tiempo se determina tomando en cuenta los criterios recomendados de efectos en la salud o factores de inmisión de los contaminantes a determinar, por medio de los límites de detección del método de muestreo utilizado y por medio de los criterios establecidos en las normas oficiales de calidad del aire de cada país.

Para el caso en estudio se realizaron períodos de medición de 8 horas, correspondientes a la jornada laboral.

Algunas recomendaciones de los manuales OMS/UNEP, GEMS/AIR, en cuanto a tiempos de muestreo, son las siguientes:

- El muestreo anual se recomienda para determinar las variaciones estacionales y para obtener promedios anuales.

- El muestreo diario se recomienda si se necesitan realizar comparaciones significativas a corto plazo.
- Se requiere de muestreo con resolución horaria únicamente cuando existan condiciones de episodio de contaminación.

### **Configuración De Sistemas De Muestreo**

Una vez seleccionados los sitios de muestreo, el siguiente paso será la configuración del sistema de muestreo, que implica el arreglo o el diseño del sistema, desde la toma de muestra, hasta su captura en el muestreador.

El diseño de un sistema de muestreo puede ser exclusivamente el diseño del montaje de un muestreador, como es el caso de los muestreadores pasivos, el diseño de una línea de muestreo, para muestreadores activos o un sistema completo de multianalizadores para monitorear diversos contaminantes, como el diseño de una estación de muestreo.

Sin embargo, existen algunos criterios comunes a casi todos los sistemas de muestreo, tanto para muestreadores pasivos, activos y automáticos, que deben tomarse en cuenta para establecer el diseño del sistema de muestreo, y son:

- Las concentraciones de todos los contaminantes de interés que van a ser

medidas no deberán alterarse a su paso por el sistema de muestreo, por lo que se requiere el uso de materiales inertes, tanto para la entrada de la muestra, las tuberías y las conexiones, principalmente si es el caso del estudio de gases reactivos.

- Los tubos que no se limpian escrupulosamente pueden causar pérdidas de muestreo significativas, como en el caso de muestreo de gases reactivos, por lo que deberán de ser limpiados periódicamente.
- Deberán removerse de la corriente de muestreo, partículas, gases o líquidos, que puedan contaminar la muestra o el medio de colección, y sustancias que puedan interferir con la operación de los analizadores, como partículas o agua condensada.
- El sistema de muestreo debe mantenerse en óptimas condiciones, deben limpiarse y remplazarse las partes antes o en el momento en que muestren signos de envejecimiento, fallas o contaminación.
- El tiempo de permanencia de los aerosoles en el sistema deberá minimizarse, al igual que la interacción de la corriente de aire con los materiales de la línea de muestreo, los cuales como ya se indicó, deberán ser inertes.

- Uno de los principales problemas en las líneas de muestreo son las fugas, se recomienda que se revise el flujo del sistema y en caso de evidencia de fuga o daño se corrija inmediatamente el problema.
- La tubería deberá ser lo más corta posible, evitándose codos y partes con restricciones donde pudiera acumularse material particulado.

### **Líneas de Muestreo**

Los requerimientos mínimos de equipo de un sistema de muestreo con una línea de muestreo, para llevar a cabo la colección de un contaminante en una solución absorbente, por medio de muestreadores activos son:

- **Línea de muestreo que consta de:**
  - Entrada, mangueras y tuberías.
  - Sistemas de medición de flujo.
  - Bomba.
- **Un sistema de colección de la muestra que consta de:**
  - Instrumentos de colección.
  - Medio de colección.

**Entrada, mangueras y tuberías.** El MOUDI debe ser colocado en un lugar protegido de la lluvia para prevenir que esta penetre dentro del equipo, las líneas (mangueras), deberán ser químicamente inertes y transparentes, de

manera que se puedan llevar a cabo inspecciones visuales para chequear que no se tengan condensaciones, obstrucciones o depósitos de polvo, durante la operación. El material debe ser flexible, para que no se colapse por acción del vacío, se recomienda una longitud máxima de tres metros.

**Bomba.** Es la máquina que creará el vacío para forzar a una corriente de aire medida a pasar por un sistema de colección. Se requiere de bombas capaces de mantener flujos estables en un determinado rango.

**Manómetros.** Los manómetros miden la caída de presión que se ocasiona por la resistencia del equipo de muestreo al paso del flujo de gas. Lo cual permite corregir el volumen de gas muestreado a condiciones estándar.

#### **Equipo Necesario para muestreo en la Fuente.**

1. Impactador de cascada (MOUDI)
2. Bomba de vacío
3. Manómetro
4. Balanza
5. Estación meteorológica

Las características principales de los equipos utilizados en las mediciones son mostradas en la tabla 3.

**TABLA 3**  
**EQUIPOS UTILIZADOS EN EL MUESTREO DE PARTICULAS**

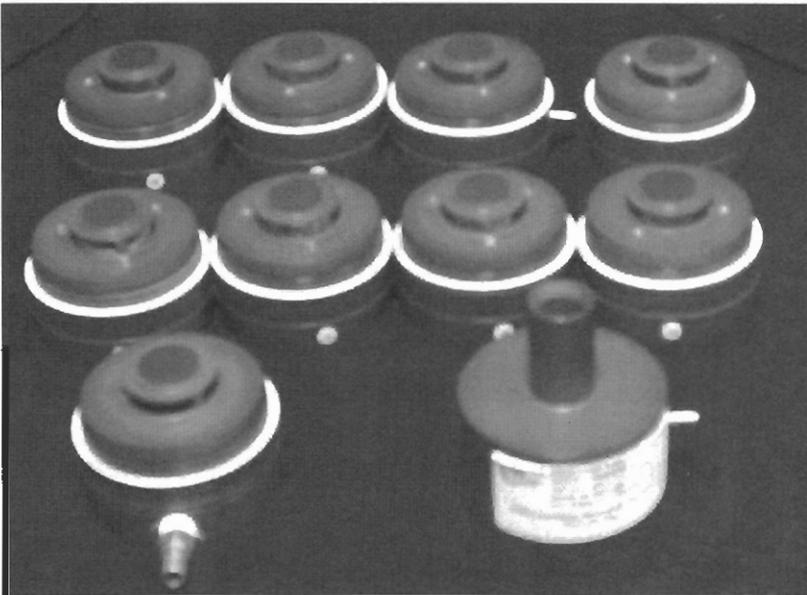
DESCRIPCIÓN	MARCA	MODELO
Impactador de Cascada (MOUDI)	MSP Corp.	100
Bomba	GAST	0523-101G-G18DX
Manómetro	MAGNEHELIC	
Balanza	ATI CAHN	33
Estación Meteorológica	ELE	

#### **Preparación del Impactador de Cascada.**

1. Limpiar todos los componentes de cualquier suciedad o polvo y revisar que no existan obstrucciones en las diferentes etapas del impactador. Se debe inspeccionar si las boquillas de las etapas se encuentran tapadas (se sostiene la etapa y se la coloca a trasluz para verificar si la luz pasa a través de los agujeros de las boquillas).
2. Todas las partes del muestreador deberán estar limpias, para lo cual es conveniente usar a un poco de jabón o detergente y luego lavar las piezas con agua destilada y secarlas antes de ensamblarlas.
3. Revisar el estado de los o-rings de las diferentes etapas del equipo y reemplazar los que se encuentren con signos de desgaste.

4. Con una lista de chequeo se debe revisar posibles partes perdidas del impactador.
5. Al encender el equipo en vacío, el manómetro debe marcar una presión de 22.6 pulg. de agua. Es probable que se necesite regular dicha presión por medio de la válvula que se encuentra en la bomba de vacío, si existen variaciones en las lecturas del manómetro es indicativo de la presencia de fugas en el sistema.
6. Antes de proceder a tomar la muestra es necesario encender el MOUDI en vacío (sin el filtro y los substratos) durante 15 a 30 minutos. Esto se realiza con la finalidad de evitar la presencia de agua en el impactador producida por la condensación del vapor de agua presente en el ambiente, lo cual podría alterar la medición.
7. Una vez efectuado el calentamiento del equipo, se lo separa en sus diferentes componentes y se debe revisar que las etapas del impactador se encuentren libres de polvo antes de proceder a colocar los substratos y filtro en sus respectivos lugares.
8. En el lugar de muestreo se procederá a ensamblar las etapas que conforman el equipo. En primer lugar se colocará el filtro de cuarzo, el cual se ubicará en la parte final del equipo, posteriormente se deberá colocar la etapa que tenga el diámetro de boquillas más pequeño.

- Continuar colocando las etapas y substratos de colección, respetando el orden de menor a mayor diámetro de boquillas. Finalmente se coloca la etapa de admisión de la muestra.



**FIGURA 3.1. ETAPAS DE UN IMPACTADOR DE CASCADA**

- En la colocación de los filtros y substratos es necesario asegurarse que estos no se doblen ni dañen y que queden perfectamente planos. Al momento de ensamblar el equipo se debe tener cuidado de no tocar la parte interna y sobre todo las boquillas de las diferentes etapas, ya que es posible que algunas partículas que se encuentran en los dedos se depositen sobre las etapas.
- Una vez que se ha ensamblado el impactador se procede a conectar el equipo a la bomba y al manómetro por medio de las mangueras, tomando en cuenta que estas queden ajustadas para evitar fugas.

12. Instalar el MOUDI en el sitio a muestrear, antes de encender la bomba de vacío se debe verificar el voltaje de salida de la toma de energía y en caso de ser necesario utilizar un regulador de voltaje o supresores de pico.
13. Encender el MOUDI y anotar la fecha y hora de inicio del muestreo, así como los datos meteorológicos del día en que se realiza la medición.
14. Es recomendable tener una bitácora de campo para documentar cualquier variación que pueda tener relación con el muestreo o el proceso de operación del impactador de cascada.
15. Durante el muestreo se debe revisar periódicamente la presión en el manómetro (22.6 pulg H<sub>2</sub>O), la misma debe permanecer inalterable, ya que garantiza que el flujo del gas (30 l/min) a lo largo del período de muestreo será un flujo isocinético.
16. Concluido el muestreo, se debe anotar la hora de finalización. Posteriormente se debe apagar la bomba de vacío, desconectar y desarmar el equipo, colocando los substratos de aluminio y filtro en el portafiltros para llevar la muestra hacia un laboratorio, donde se procederá a su análisis y pesaje final.

17. Si las láminas de colección necesitan ser cambiadas en el sitio de muestreo para realizar más pruebas, el impactador debe ser desarmado en un lugar limpio y aislado de los elementos (lluvia, viento, etc). Teniendo cuidado de no contaminar las láminas de colección al volver a colocar estas dentro del impactador.

### **3.2. Protocolo para el uso de la balanza analítica**

El lugar donde se encuentre ubicada la balanza, debe tener los siguientes requerimientos:

1. Debe estar en un lugar nivelado y estable, con mínima vibración en la mesa de pesaje. Es necesario comprobar que la burbuja de aire se encuentre dentro del círculo que indica la correcta nivelación de la balanza.
2. La balanza no debe ser expuesta directamente a la luz solar, calentadores, u otras fuentes de calor. Esto puede incrementar considerablemente la temperatura dentro de la cámara de pesaje, dando como resultado una lectura incorrecta.
3. Se debe evitar cambios bruscos en la temperatura del cuarto donde se encuentra la balanza.

4. La balanza no debe ser expuesta a extrema humedad durante largos períodos. La humedad existente en el aire puede condensarse sobre las superficies de una balanza fría.

### **Instrucciones Generales para el Manejo de Muestras**

Para el pesaje de las muestras se utilizó una balanza ATI Cahn Modelo 33 con una precisión de 1  $\mu\text{g}$ . Debido a la alta sensibilidad de la balanza se debe tener cuidados especiales durante el uso de la misma y de las muestras, porque cualquier factor por mínimo que parezca puede afectar la medición y por consecuencia el resultado final sería erróneo.

Como una regla general, los filtros y substratos a ser pesados antes y después del muestreo deben tener las mismas condiciones de temperatura y humedad de la balanza. Así, los filtros se mantuvieron en el cuarto de balanzas a 25 °C y 50% HR, durante 24 horas previas y posteriores al muestreo, manteniendo variaciones máximas de  $\pm 1\%$  °C y  $\pm 5\%$  de HR.

Las muestras a ser pesadas nunca deben ser manipuladas sin el uso de guantes.

El efecto de la temperatura corporal, la alta higroscopía y los aceites naturales de los dedos pueden causar una interferencia considerable en la muestra durante el pesaje.

Es recomendable realizar un ensayo de pesaje antes de empezar pesar las muestras, la temperatura dentro de la cámara de pesaje puede diferir de la temperatura de los alrededores de la balanza, si la cámara de pesaje no ha sido abierta en un período relativamente largo.

Si la muestra fue colocada en un recipiente, es indispensable asegurarse que la pantalla de la balanza se encuentre encendida con el recipiente vacío antes de realizar el pesaje. Una vez que la balanza se encuentra encendida se procede a colocar la muestra dentro de la cámara de pesaje, para lo cual se abre una de las dos compuertas dispuestas a los costados de la misma.

La muestra debe ser colocada suavemente sobre el plato de pesaje y se procede a cerrar la cámara de pesaje. Una vez que la cámara de pesaje se encuentra cerrada, es necesario esperar a que la lectura del peso se estabilice, usualmente esto demora 10 segundos. La precisión de la lectura de pesaje aumenta al realizar procedimientos sucesivos de pesaje.

Algo que incide en las muestras a ser analizadas es la carga estática. Una superficie cargada estáticamente, puede estar dominada por una carga de iones positivos o negativos. Esta carga en la superficie atrae los materiales con carga opuesta, además de materia extraña como suciedad y polvo. Debido a esta atracción es muy probable que materia adicional se adhiera a la muestra que está siendo analizada, lo cual produciría datos erróneos.

Para neutralizar rápidamente las cargas estáticas de las partículas que se encuentran en el medio se utiliza un dispositivo emisor de energía alfa. Esto se debe a que emite una gran cantidad de iones cargados positiva y negativamente en la vecindad del material afectado. El material cargado atrae una cantidad suficiente de iones con carga opuesta con lo que se elimina completamente la carga estática. Las fuentes de energía alfa eliminan totalmente el incremento de la estática, la ionización del aire no produce efectos adversos en las personas. Para el caso presente se utilizó una barra de polonio 210 marca Staticmaster.

El material emisor se encuentra sellado dentro de una base de plata y una lámina de oro. Un blindaje final de oro provee una protección adicional. Se obtiene como resultado final un material insoluble e inerte con los demás materiales. Existe una protección extra dada por una rejilla de metal, la cual previene el contacto directo con la superficie activa. Estos procedimientos de protección eliminan riesgos para el usuario, los cuales pueden aparecer si el Po 210 es inhalado o ingerido.

### **3.3. Protocolo para el manejo de muestras y su análisis gravimétrico**

El análisis completo del material particulado que contiene una muestra atmosférica es más complicado que el de una muestra gaseosa, ya que comprende básicamente tres diferentes tipos de análisis:

- La estimación o cuantificación de la masa.
- La caracterización de la distribución por tamaños de partículas.
- El análisis físico y químico de las fracciones particuladas.

**Estimación o cuantificación de la masa, método gravimétrico.** El principal procedimiento para la cuantificación de la masa es un método gravimétrico en el cual los filtros para la colección de la muestra de partículas, se acondicionan a una temperatura y humedad y se pesan (utilizando una microbalanza) antes y después de utilizarse en el muestreo, para determinar el peso (masa) neto resultado de la colección del material particulado, que quedó en el filtro después del muestreo.

Todos los muestreadores activos y pasivos requieren de este tipo de análisis gravimétrico para cuantificar la concentración del material particulado, lo cual implica el montaje del filtro, su colección y su envío al laboratorio para su análisis. Otros métodos para la estimación de la masa del material particulado son la Reflectometría y la Nefelometría.

**Los métodos gravimétricos.** Son métodos analíticos cuantitativos en los cuales las determinaciones de las sustancias se llevan a cabo por una diferencia de pesos. Existen métodos gravimétricos para conocer la concentración de una muestra en solución, que llevan a cabo precipitaciones de las muestras por medio de la adición de un exceso de reactivo y

aprovechando el efecto del ion común, y otros en los que directamente se pesa el material colectado en un filtro. En este último método gravimétrico se determina la masa, pesando el filtro antes y después del muestreo con una balanza a temperatura y humedad relativa controladas.

**El análisis físico y químico de las fracciones particuladas.** La caracterización del material particulado tanto física (tamaño), como químicamente (composición), se lleva a cabo generalmente con el propósito de determinar la presencia de compuestos o contaminantes específicos como metales. Estas caracterizaciones son importantes para estimar los efectos potenciales de estas partículas en la salud y en el medio ambiente y para la investigación de la contribución de diferentes fuentes de partículas al PST.

También se pueden llevar a cabo investigaciones retrospectivas de cambios en los patrones de los contaminantes con los filtros que se mantienen en los bancos de especímenes, por medio de diferentes técnicas de análisis que mencionaremos a continuación.

Actualmente se cuenta con una gran variedad de técnicas de análisis físicas y químicas para identificar la composición de las partículas colectadas. Las técnicas químicas se usan principalmente para determinar entidades funcionales como grupos de iones y volumen de metales en especímenes,

mientras que las técnicas físicas se emplean para inspeccionar partículas aisladas y para determinar la composición elemental de la molécula/cristalina.

### **Selección de Filtros**

Un factor que se tiene que tomar en cuenta en el muestreo de partículas es la selección del filtro que se va a utilizar. Un filtro es un material compuesto de fibras fuertemente entretejidas entre sí o de una membrana plástica con poros microscópicos.

La selección del tipo de filtro que debe utilizarse depende del tipo de muestreo que se está llevando a cabo y de sus subsecuentes análisis químicos y físicos. No existe un filtro apropiado para todos los análisis, sin embargo a continuación se enumeran algunas características que deberán considerarse al seleccionar un filtro:

- **Eficiencia de muestreo de partículas:** un filtro deberá remover más del 99% de las partículas suspendidas que se hacen pasar a través de él, sin importar el tamaño de la partícula o su flujo.
- **Estabilidad mecánica:** los filtros deberán permanecer planos y en una pieza de manera que puedan proveer un buen sello para eliminar fugas en el sistema de muestreo.

- Estabilidad química: los filtros no deben reaccionar químicamente con su depósito, a pesar de que se les someta a solventes fuertes de extracción. Tampoco deben absorber gases que no se quieran coleccionar.
- Estabilidad a la temperatura: los filtros deben mantener su estructura y porosidad a temperaturas típicas de muestreo y análisis.



**FIGURA 3.2. FILTRO UTILIZADO DURANTE UN MUESTREO**

- Resistencia al flujo y capacidad de carga: los filtros deberán permitir el paso de aire suficiente para satisfacer los requerimientos de flujo del instrumento y además obtener un depósito adecuado.
- Las partículas coleccionadas no deberán taponarlo al grado que el flujo decazca en el muestreador, ya que esto provocaría un decremento en la eficiencia de colección.

TABLA 4

## TIPOS DE FILTRO PARA MUESTREO DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS

Tipo de Filtro	Comentarios y Recomendaciones
De Fibras:	Estos filtros tienen relativamente bajas caídas de presión y se usan comúnmente en el HVS (Muestreador de Alto Volumen).
Celulosa	Puede absorber agua por lo que se recomienda un cuidadoso acondicionamiento antes de ser pesado.
Fibra de vidrio	Tienen una gran capacidad y se recomiendan cuando la determinación de la concentración se efectúa gravimétricamente, ya que presentan la formación de diversos compuestos sobre todo en ambientes de smog fotoquímico.
Fibra de cuarzo	Proveen valores de la masa más precisos que los filtros anteriores, pero son frágiles, contienen cantidades variables de Al y Si y adsorben vapores orgánicos, HNO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> y SO <sub>2</sub> .
De Membrana:	Proveen mejores muestras para estudios de análisis elemental de trazas de elementos. Su eficiencia de colección depende del tamaño del poro.
Policarbonato	Fabricado con una base de carbón por lo que es inapropiado para el análisis de carbón. Usado principalmente para el análisis de asbestos y minerales. Diámetro promedio de poro de 0.8 µm.
Teflón	Inerte a la adsorción de gases, pero también inapropiado para el análisis de carbón.
Cloruro de Polivinilo	Se disuelve en algunos solventes orgánicos. El único compatible con el método de análisis de difracción de rayos X.

En la tabla 4 se presentan los filtros más utilizados con sus respectivas recomendaciones y comentarios con respecto a su utilización.

Un filtro de cuarzo de 37 mm, tipo 2500 QAT-UP, marca Pallflex fue el filtro que se utilizó durante los muestreos realizados en el presente estudio, a continuación se presenta la tabla 5 que indica las características de este filtro:

**TABLA 5**  
**CARACTERÍSTICAS DEL FILTRO PALLFLEX 2500 QAT-UP**

Descripción	Filtro
Material del Filtro	Cuarzo Puro
Diámetro	25 – 90 mm
Espesor típico	432 $\mu\text{m}$
Peso del filtro	5.8 $\text{mg}/\text{cm}^2$
Razón de Flujo de Agua a 0.35 bar (5 psi)	220 $\text{mL}/\text{min}/\text{cm}^2$
Razón de Flujo de Aire a 0.7 bar (10 psi)	73 $\text{L}/\text{min}/\text{cm}^2$
Máximo Temperatura de Operación – Aire	1093 $^{\circ}\text{C}$ (2000 $^{\circ}\text{F}$ )
Retención de Aerosol*	99.9%

\* Según ASTM D 2986-71 0.3  $\mu\text{m}$  a 32  $\text{L}/\text{min}/100 \text{ cm}^2$

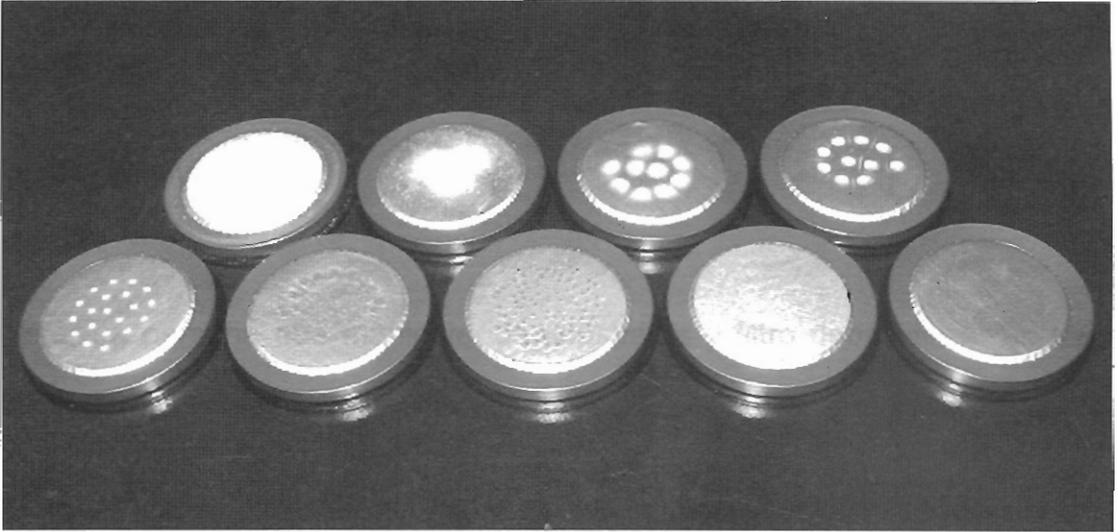
### **Manejo de Muestras**

Así como es fundamental para evitar errores de medición la correcta instalación del impactador de cascada, y el uso apropiado de la balanza analítica, no menos importante es el manejo de las muestras obtenidas luego del muestreo.

A continuación se detallan los pasos a seguir para un apropiado manejo de los filtros antes y después del muestreo:

- Los substratos y filtro deberán ser colocados 24 horas antes de su uso en un lugar que posea condiciones estables de temperatura y humedad relativa (laboratorio).
- Posteriormente deben ser pesados para definir la masa inicial de los mismos.
- Después de haber realizado el pesaje inicial, el filtro deberá ser colocado en su respectivo contenedor. El filtro es tomado con pinzas y depositado sobre la base de su contenedor. Una vez que se encuentre correctamente alineado se debe colocar el anillo que lo asegura a su contenedor, posteriormente se coloca la tapa del contenedor, con lo cual se evita que el polvo presente en el medio se asiente sobre el filtro antes de iniciar el muestreo. Este paso debe ser repetido para los substratos de aluminio.
- Para la colección de la muestra se debe utilizar un filtro de microfibra ultra pura de cuarzo, en este caso se utilizó un filtro de cuarzo de 37 mm de diámetro marca Pallflex, tipo 2500 QAT – UP, también se puede usar substratos de fibra de vidrio. Para el resto de las etapas se utilizará substratos de papel de aluminio de 47 mm de diámetro.

- Si se va a muestrear un aerosol seco es recomendable aplicar una delgada capa de grasa o silicón sobre los substratos de las diferentes etapas del impactador, con esto se logra disminuir el rebote de las partículas.
- Si se va a muestrear a temperaturas extremadamente altas, se hará necesario colocar los substratos dentro de un horno antes de ser pesados para eliminar los componentes volátiles que se encuentren en la grasa los cuales pueden escapar durante el muestreo y afectar los datos del peso.
- Para muestreos con temperaturas por encima de los 260 °C, se hará necesario utilizar grasa especial de poca volatilidad.
- Los contenedores de los substratos deben ser numerados para identificar la etapa a la cual corresponden y así evitar cualquier confusión con los mismos. Posteriormente los substratos y filtro deben ser colocados en un portafiltro que sirve para transportarlos hasta el lugar a muestrear, evitando cualquier tipo de contaminación.
- Cuando el muestreo ha concluido, el equipo debe ser trasladado hacia el laboratorio donde se realizó el pesaje inicial. Una vez en este lugar se debe proceder a desarmarlo y extraer los substratos y filtro, los cuales serán abiertos en un medio ambiente protegido.



**FIGURA 3.3. SUBSTRATOS DE LAS DIFERENTES ETAPAS  
POSTERIOR A UN MUESTREO**

- Para prevenir el ingreso de partículas una vez que ha culminado el muestreo se debe cubrir la etapa de admisión del impactador. Las superficies exteriores deben ser limpiadas para evitar la contaminación durante la descarga del equipo.
- Se debe mantener al impactador en una posición vertical, esto evitará la pérdida de partículas de los diferentes substratos de colección. Es necesario tener cuidado de no alterar el peso de las láminas de colección durante su manipulación.
- El filtro y los substratos son colocados en “cuarentena” durante 24 horas, bajo las condiciones iniciales de temperatura y humedad relativa. Una vez transcurrido este periodo se realiza el pesaje final.

- Es recomendable tomar fotografías de los substratos de colección de partículas para ilustrar los colores u otras características de las muestras de partículas.

Nota: La persona que manipule los substratos y filtro debe utilizar en todo momento un par de guantes nuevos.

# **CAPÍTULO 4**

## **4. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

El análisis completo del material particulado que contiene una muestra atmosférica es más complicado que el de una muestra gaseosa, ya que comprende además de la colección de la muestra, la clasificación por tamaños o la identificación morfológica de las partículas. El material particulado aerotransportado está compuesto de partículas sólidas y líquidas, suspendidas y dispersas en el aire. Las propiedades de estas partículas varían en términos de su composición química, morfología (tamaño / forma) y características eléctricas (carga, resistencia).

La caracterización de la distribución por tamaños de partículas se lleva a cabo principalmente durante el muestreo por medio de impactadores o puede llevarse a cabo en el laboratorio durante los análisis físicos en los que se estudia el tamaño y forma de partículas aisladamente, aunque en

estos análisis es más difícil obtener la relación entre un cierto rango de tamaño de partículas y el total de ellas, ya que al colectarse juntas en un mismo filtro pueden sufrir aglutinamientos.

La mediana, media aritmética, y modo ayudan a caracterizar la distribución de la masa. El **diámetro de masa medio (MMD)** es el diámetro de partícula que divide la frecuencia de distribución en la mitad; el cincuenta por ciento de la masa del aerosol posee partículas con un diámetro grande, y el cincuenta por ciento restante tiene partículas con un diámetro pequeño.

La **media aritmética del diámetro**, usualmente denominado diámetro medio, es el promedio aritmético de la distribución de diámetro de la partícula. El valor de la media aritmética es sensible a las cantidades de material particulado en los extremos al inicio y final de la distribución. El **modo** representa el valor que aparece más frecuentemente en la distribución.

En una distribución de tamaño de partículas, el modo es el diámetro de partícula que aparece con mayor frecuencia.

#### **4.1. Cálculo de concentraciones de masa**

Una vez que las ocho etapas del impactador y el filtro han sido pesadas antes y después del muestreo, se debe determinar la masa colectada para cada rango de tamaño.

Estos datos son representados en las columnas 1, 3, 4, y 5 de las tablas 4, 5 y 6, las cuales contienen los datos de muestreo y concentración de partículas. El peso neto ganado por cada etapa es mostrado en la columna 6. Este valor se obtiene restando el peso inicial y final de los substratos.

El porcentaje de la fracción de masa para cada etapa del impactador se representa en la columna 9 y se obtiene dividiendo el peso neto de cada etapa para la suma de todos los pesos netos y multiplicando este valor por cien.

El ECD para el filtro es cero, se asume que el filtro captura todas las partículas que llegan hasta él, esta es una asunción razonable para los filtros de fibra de vidrio donde la eficiencia de colección alcanza el 99.5%.

El límite menor de tamaño de partícula para la masa colectada en cada etapa está definido por su diámetro de corte, mientras que el límite máximo está dado por el diámetro de corte de la etapa anterior. El límite máximo de la primera etapa es usualmente tomado como infinito. La última columna contiene la fracción de masa acumulada, la fracción de masa acumulada en una etapa en particular es igual a la fracción de masa de dicha etapa más la suma de todas las fracciones de masa de las etapas por debajo de ella. El cálculo correcto rendirá el 100% para la fracción de masa acumulada de la primera fase.

La concentración de masa se expresa usualmente como la masa total de las partículas en un volumen dado. Las unidades básicas para la concentración de partículas son los microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

La concentración de masa para cada etapa se obtiene dividiendo la masa obtenida durante el muestreo, columna (7), para el producto entre el caudal del MOUDI y el tiempo que duró el muestreo, el caudal del MOUDI es de 30 l/min ( $0.0005 \text{ m}^3/\text{s}$ ), para el tiempo de muestreo se tomó en cuenta la jornada laboral de 8 horas (28800 s). La concentración de masa total es la suma de las concentraciones de masa parciales.

A continuación se presentan las tablas 6, 7 y 8 que contienen los datos correspondientes a un día de medición en cada uno de los diferentes procesos, las mediciones restantes se encuentran en el apéndice A.

## Trituradora de Yeso

TABLA 6

## DATOS DE MUESTREO Y CONCENTRACIÓN DE PARTICULAS 15-05-02

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Etapa	Rango de Tamaño Dp <sub>1</sub> , (µm)	D <sub>50</sub> (µm)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia Δm (g)	Diferencia Δm (mg)	Cm (µg/m <sup>3</sup> )	Fracción de Masa (%)	Fracción de masa acumulada (%)
0	18 - 30	18	0.0775	0.0781	0.0006	0.60	41.67	5.66	100.00
1	10.0 - 18	10	0.0788	0.0795	0.0007	0.70	48.61	6.60	94.34
2	5.6 - 10.0	5.6	0.0785	0.0796	0.0011	1.10	76.39	10.38	87.74
3	3.2 - 5.6	3.2	0.0773	0.0781	0.0008	0.80	55.56	7.55	77.36
4	1.8 - 3.2	1.8	0.0781	0.0788	0.0007	0.70	48.61	6.60	69.81
5	1.0 - 1.8	1	0.0779	0.0792	0.0013	1.30	90.28	12.26	63.21
6	0.56 - 1.0	0.56	0.0783	0.0803	0.0020	2.00	138.89	18.87	50.94
7	0.32 - 0.56	0.32	0.0787	0.0804	0.0017	1.70	118.06	16.04	32.08
8	0.18 - 0.32	0.18	0.0779	0.0791	0.0012	1.20	83.33	11.32	16.04
Filtro	0 - 0.18	0	0.0722	0.0727	0.0005	0.50	34.72	4.72	4.72
						10.60	736.11	100.00	

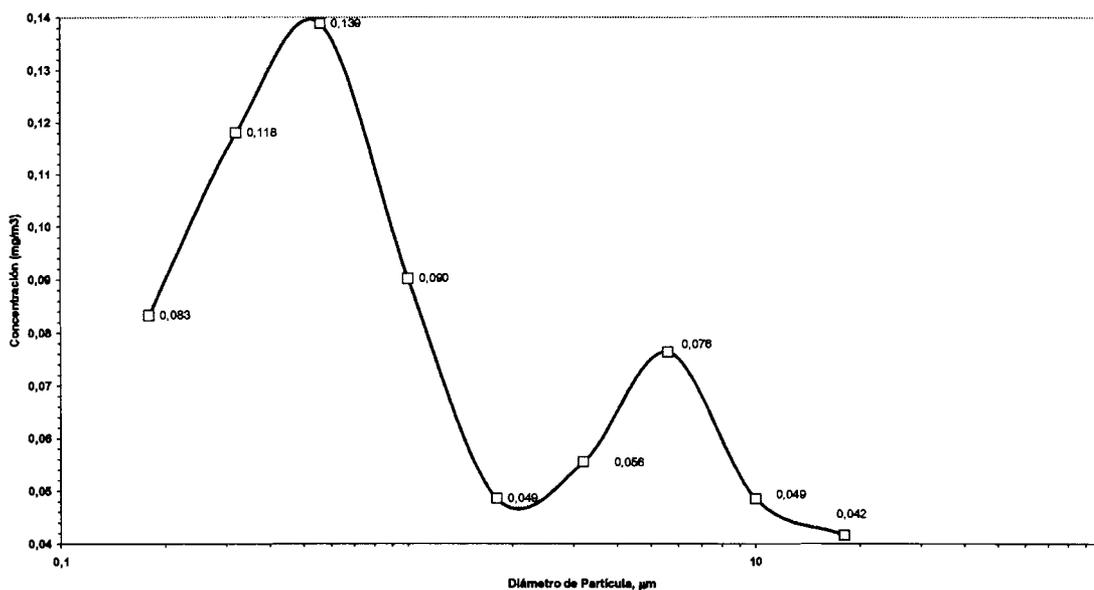


FIGURA 4.1. CONCENTRACIÓN VS DIÁMETRO DE PARTÍCULA  
15-05-02

## Trituradora de Arcilla

TABLA 7

## DATOS DE MUESTREO Y CONCENTRACIÓN DE PARTICULAS 10-06-02

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Etapa	Rango de Tamaño $Dp_{10}$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia $\Delta m$ (g)	Diferencia $\Delta m$ (mg)	$C_m$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Fracción de Masa (%)	Fracción de masa acumulada (%)
0	18 - 30	18	0.0781	0.0787	0.0006	0.60	41.67	7.32	100.00
1	10.0 - 18	10	0.0778	0.0786	0.0008	0.80	55.56	9.76	92.68
2	5.6 - 10.0	5.6	0.0783	0.0793	0.0010	1.00	69.44	12.20	82.93
3	3.2 - 5.6	3.2	0.0787	0.0795	0.0008	0.80	55.56	9.76	70.73
4	1.8 - 3.2	1.8	0.0778	0.0787	0.0009	0.90	62.50	10.98	60.98
5	1.0 - 1.8	1	0.0781	0.0794	0.0013	1.30	90.28	15.85	50.00
6	0.56 - 1.0	0.56	0.0776	0.0786	0.0010	1.00	69.44	12.20	34.15
7	0.32 - 0.56	0.32	0.0787	0.0794	0.0007	0.70	48.61	8.54	21.95
8	0.18 - 0.32	0.18	0.0788	0.0794	0.0006	0.60	41.67	7.32	13.41
Filtro	0 - 0.18	0	0.072	0.0725	0.0005	0.50	34.72	6.10	6.10
						<b>8.20</b>	<b>569.44</b>	<b>100.00</b>	

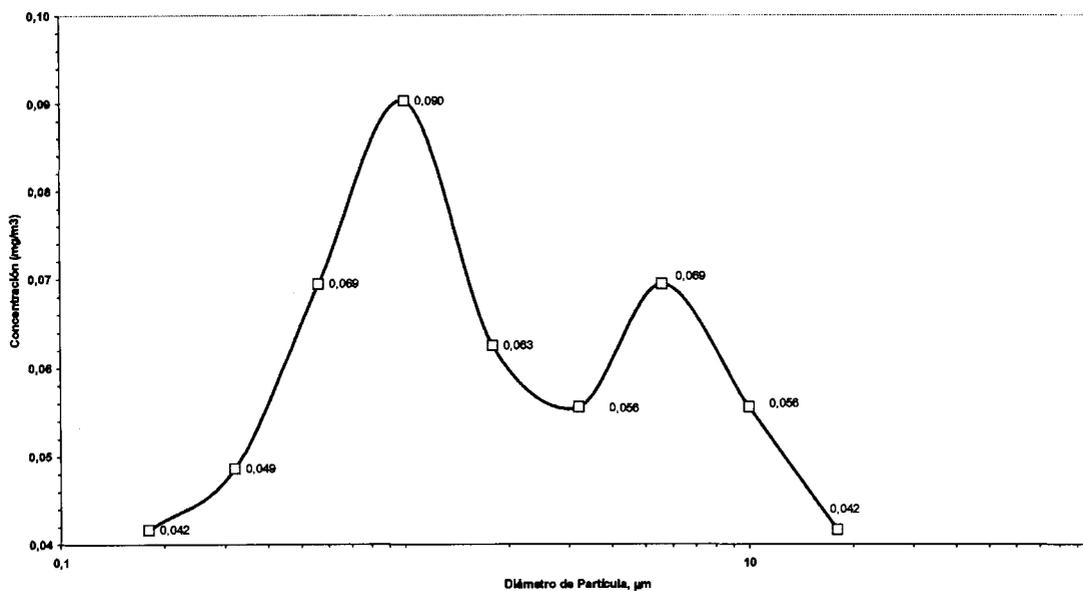


FIGURA 4.2. CONCENTRACIÓN VS DIÁMETRO DE PARTÍCULA

10-06-02

## Trituradora de Caliza

TABLA 8

## DATOS DE MUESTREO Y CONCENTRACIÓN DE PARTICULAS 24-06-02

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Etapa	Rango de Tamaño Dp <sub>1</sub> (μm)	D <sub>50</sub> (μm)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia Δm (g)	Diferencia Δm (mg)	Cm (μg/m <sup>3</sup> )	Fracción de Masa (%)	Fracción de masa acumulada (%)
0	18 - 30	18	0.0781	0.079	0.0009	0.90	62.50	8.82	100.00
1	10.0 - 18	10	0.0778	0.0788	0.0010	1.00	69.44	9.80	91.18
2	5.6 - 10.0	5.6	0.0783	0.0795	0.0012	1.20	83.33	11.76	81.37
3	3.2 - 5.6	3.2	0.0787	0.0797	0.0010	1.00	69.44	9.80	69.61
4	1.8 - 3.2	1.8	0.0778	0.0792	0.0014	1.40	97.22	13.73	59.80
5	1.0 - 1.8	1	0.0781	0.0794	0.0013	1.30	90.28	12.75	46.08
6	0.56 - 1.0	0.56	0.0776	0.0787	0.0011	1.10	76.39	10.78	33.33
7	0.32 - 0.56	0.32	0.0787	0.0796	0.0009	0.90	62.50	8.82	22.55
8	0.18 - 0.32	0.18	0.0788	0.0796	0.0008	0.80	55.56	7.84	13.73
Filtro	0 - 0.18	0	0.072	0.0726	0.0006	0.60	41.67	5.88	5.88
						10.20	708.33	100.00	

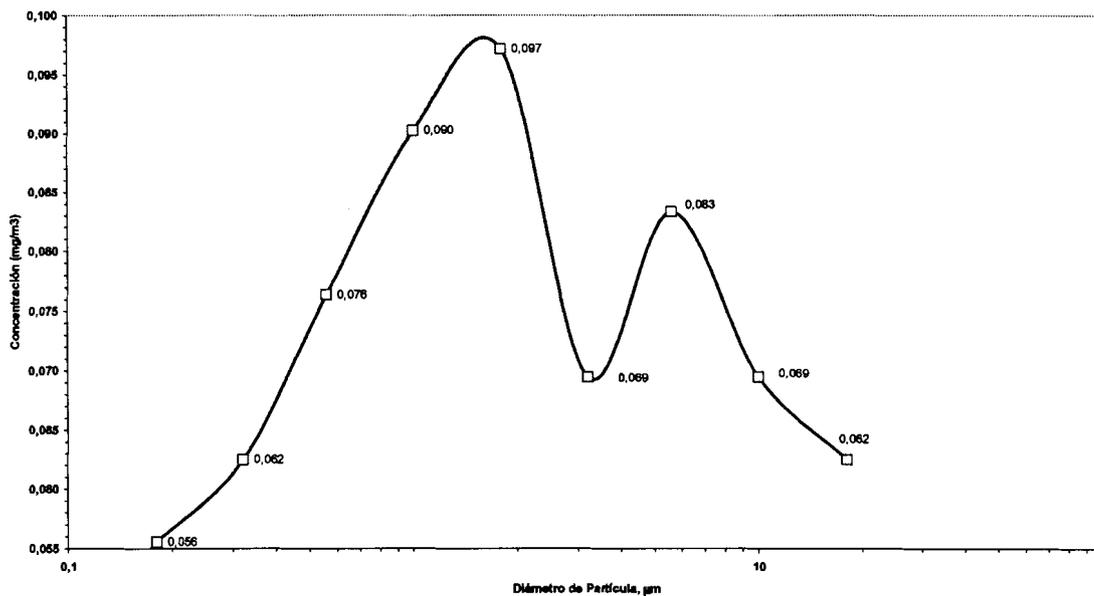


FIGURA 4.3. CONCENTRACIÓN VS DIÁMETRO DE PARTÍCULA

24-06-02

#### **4.2. Histograma de la Distribución de Masa de Partículas en Función de su Diámetro Aerodinámico.**

Es esencial un análisis de la distribución de tamaño de un aerosol. El análisis de datos más común es la distribución de masa, se realiza un gráfico de esta distribución, y se obtiene el MMD y otros parámetros de la distribución de tamaño.

El conteo de la distribución puede ser determinado mediante un conteo microscópico de las partículas recolectadas en cada etapa, pero esto raramente se lo realiza. Normalmente las distribuciones de tamaño de los aerosoles cubren un amplio rango y se hace necesario la caracterización del tamaño de un aerosol estadísticamente.

En los impactadores de cascada la distribución de masa es comúnmente usada, debido a que la masa colectada en cada etapa puede ser determinada gravimétricamente. La distribución de masa indica como el total de la masa aerotransportada es distribuida entre varios tamaños de partículas.

La manera más sencilla y directa de representar la información de los diferentes tamaños obtenidos con un impactador de cascada es un histograma, donde la altura de cada barra representa la fracción de masa para un rango de tamaño dado en la base de la barra.

Los datos de la tablas de muestreo y concentración de partículas son utilizados para la construcción del histograma de distribución de masa. Para esto se divide los valores de la fracción de masa, columna (4) para el ancho del tamaño del intervalo asociado con cada fracción, columna (3) y para 100 para convertir de porcentaje a fracción como se muestra en la tabla 9.

El histograma tiene una ventaja sobre la distribución acumulada, un error de medición solo afecta un tamaño del rango, mientras que en una distribución acumulada un error distorsiona totalmente los resultados finales.

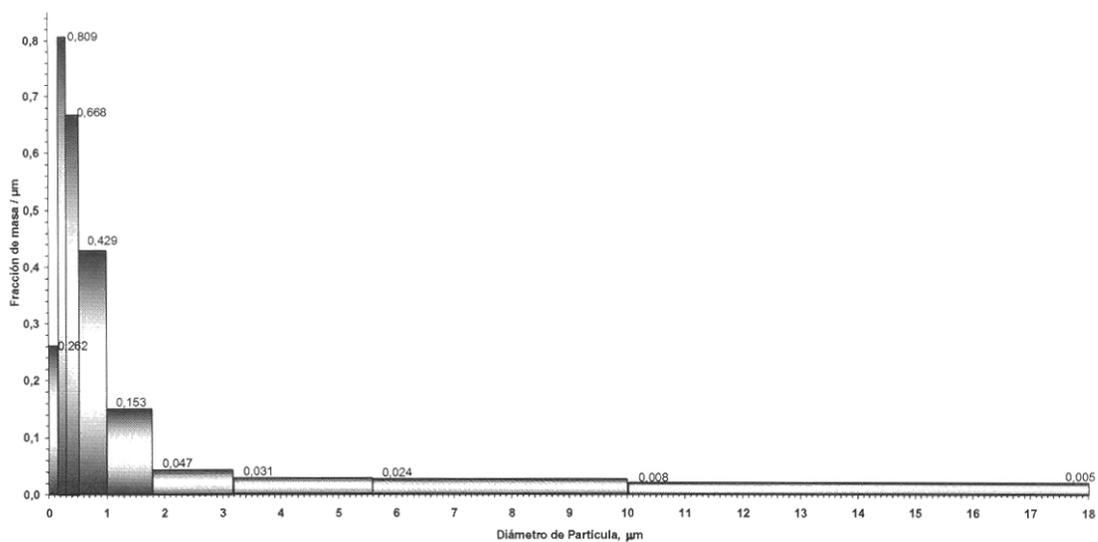
A continuación se muestran las tablas con los datos obtenidos durante un día de muestreo en la trituradora de yeso, trituradora de caliza y de arcilla, así como los histogramas generados a partir de esta información, los resultados y gráficos correspondientes a los otros días se encuentran en el apéndice B.

## Trituradora de Yeso

TABLA 9

DATOS PARA ELABORACIÓN DE HISTOGRAMA  
DE PARTICULAS 15-05-02

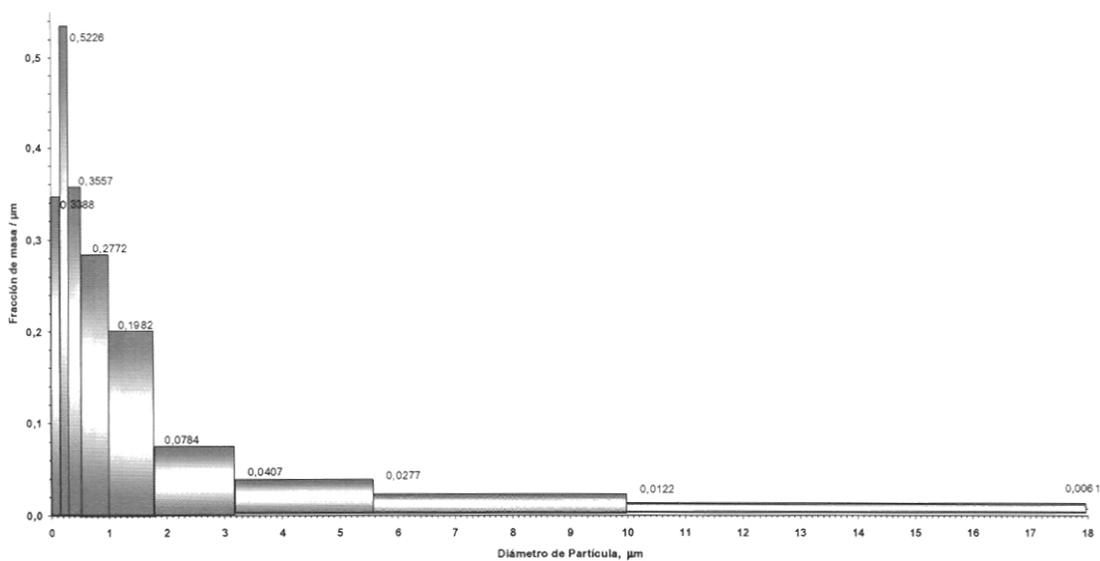
1	2	3	4	5
Etapa	Rango de Tamaño (μm)	Intervalo (μm)	Fracción de Masa	Fracción de Masa/ intervalo (1/μm)
0	18 - 30	12	0,0566	0,005
1	10.0 - 18	8	0,0660	0,008
2	5.6 - 10.0	4,4	0,1038	0,024
3	3.2 - 5.6	2,4	0,0755	0,031
4	1.8 - 3.2	1,4	0,0660	0,047
5	1.0 - 1.8	0,8	0,1226	0,153
6	0.56 - 1.0	0,44	0,1887	0,429
7	0.32 - 0.56	0,24	0,1604	0,668
8	0.18 - 0.32	0,14	0,1132	0,809
Filtro	0 - 0.18	0,18	0,0472	0,262

FIGURA 4.4.HISTOGRAMA DE LA DISTRIBUCIÓN  
DE MASA DE PARTÍCULAS 15-05-02

## Trituradora de Arcilla

**TABLA 10**  
**DATOS PARA ELABORACIÓN DE HISTOGRAMA**  
**DE PARTICULAS 10-06-02**

1	2	3	4	5
Etapa	Rango de Tamaño (μm)	Intervalo (μm)	Fracción de Masa	Fracción de Masa/intervalo (1/μm)
0	18 - 30	12	0,0732	0,006
1	10.0 - 18	8	0,0976	0,012
2	5.6 - 10.0	4,4	0,1220	0,028
3	3.2 - 5.6	2,4	0,0976	0,041
4	1.8 - 3.2	1,4	0,1098	0,078
5	1.0 - 1.8	0,8	0,1585	0,198
6	0.56 - 1.0	0,44	0,1220	0,277
7	0.32 - 0.56	0,24	0,0854	0,356
8	0.18 - 0.32	0,14	0,0732	0,523
Filtro	0 - 0.18	0,18	0,0610	0,339

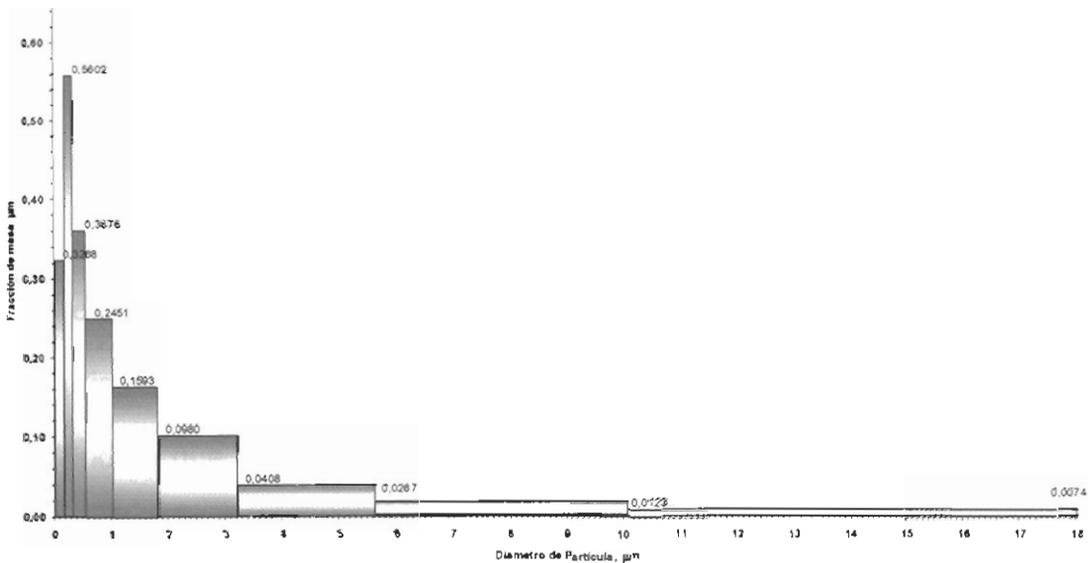


**FIGURA 4.5.HISTOGRAMA DE LA DISTRIBUCIÓN**  
**DE MASA DE PARTÍCULAS 10-06-02**

## Trituradora de Caliza

**TABLA 11**  
**DATOS PARA ELABORACIÓN DE HISTOGRAMA**  
**DE PARTICULAS (24-06-02)**

1	2	3	4	5
Etapa	Rango de Tamaño (μm)	Intervalo (μm)	Fracción de Masa	Fracción de Masa/ intervalo (1/μm)
0	18 - 30	12	0,0882	0,007
1	10.0 - 18	8	0,0980	0,012
2	5.6 - 10.0	4,4	0,1176	0,027
3	3.2 - 5.6	2,4	0,0980	0,041
4	1.8 - 3.2	1,4	0,1373	0,098
5	1.0 - 1.8	0,8	0,1275	0,159
6	0.56 - 1.0	0,44	0,1078	0,245
7	0.32 - 0.56	0,24	0,0882	0,368
8	0.18 - 0.32	0,14	0,0784	0,560
Filtro	0 - 0.18	0,18	0,0588	0,327



**FIGURA 4.6. HISTOGRAMA DE LA DISTRIBUCIÓN**  
**DE MASA DE PARTÍCULAS 24-06-02**

### **4.3. Distribución de Masa Acumulada en Función de su Diámetro Aerodinámico**

Otra forma de representar la distribución de tamaño es la función de distribución acumulada, donde la fracción de masa en cualquier rango de tamaño es determinada por la diferencia en la posición vertical entre puntos asociados con el límite mayor y menor del rango. Con la distribución acumulada es posible interpretar los datos de un impactador de cascada.

Las columnas 2 y 10 de la tablas 6, 7 y 8 son los datos con los cuales se graficará la fracción de masa acumulada (eje vertical) versus el diámetro aerodinámico (eje horizontal). Dibujar la distribución acumulada en papel aritmético es válido para todas las distribuciones de tamaño pero generalmente es menos utilizada debido al uso de papel probabilístico.

Este tipo de gráfico proporciona una visión acerca de la forma de la distribución, pero no permite el cálculo de otras cantidades de distribución de tamaño. En el caso de la figura 4.7, el primer punto indica que el 4.72 % de las partículas colectadas se encuentran por debajo del límite superior del rango más pequeño que es 0 - 0.18  $\mu\text{m}$ . El segundo punto, 11.32 %, corresponde a 0.32  $\mu\text{m}$ , el límite superior del segundo intervalo.

Esta cantidad indica que el 11.32 % de las partículas de la muestra está por debajo de 0.32  $\mu\text{m}$ .

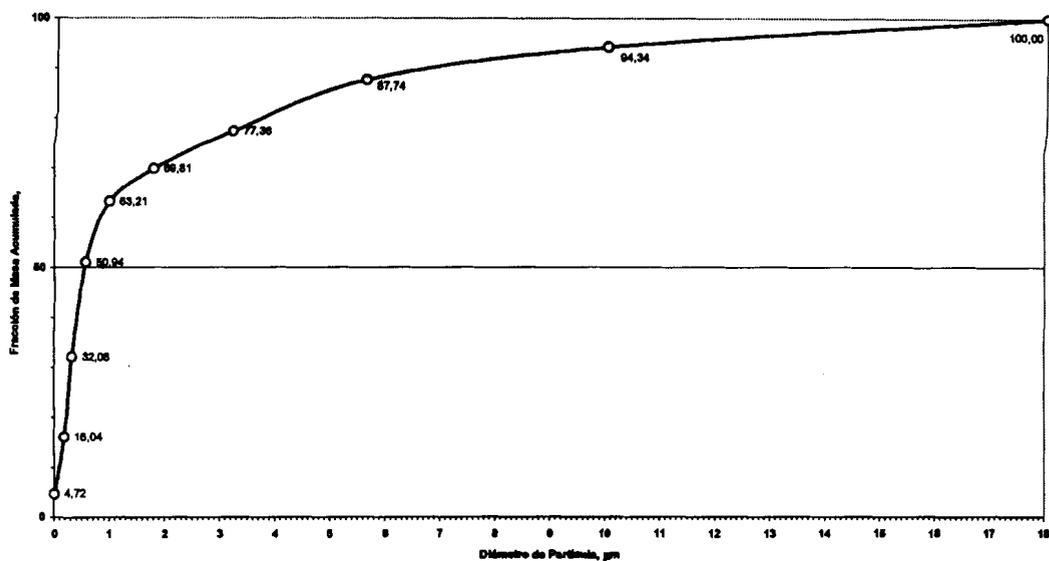
Se continúa graficando cada valor de la fracción de masa acumulada versus el límite superior de cada rango de tamaño desde el filtro hasta llegar a la primera etapa, donde el valor de la fracción de masa acumulada es 100%, teniendo en cuenta que el límite superior de este intervalo es considerado infinito.

La mediana de la masa puede ser obtenida directamente de la figura 4.7 como el tamaño correspondiente al 50 % de la fracción de masa acumulada. Otros valores percentiles pueden ser obtenidos directamente del gráfico. Así, el 90% de la masa esta constituida por partículas menores a 10.0  $\mu\text{m}$ .

También es posible leer directamente del gráfico el porcentaje de la masa total constituido por partículas debajo (o arriba) de un cierto tamaño, así el 47.37% de las partículas son menores a 1  $\mu\text{m}$ .

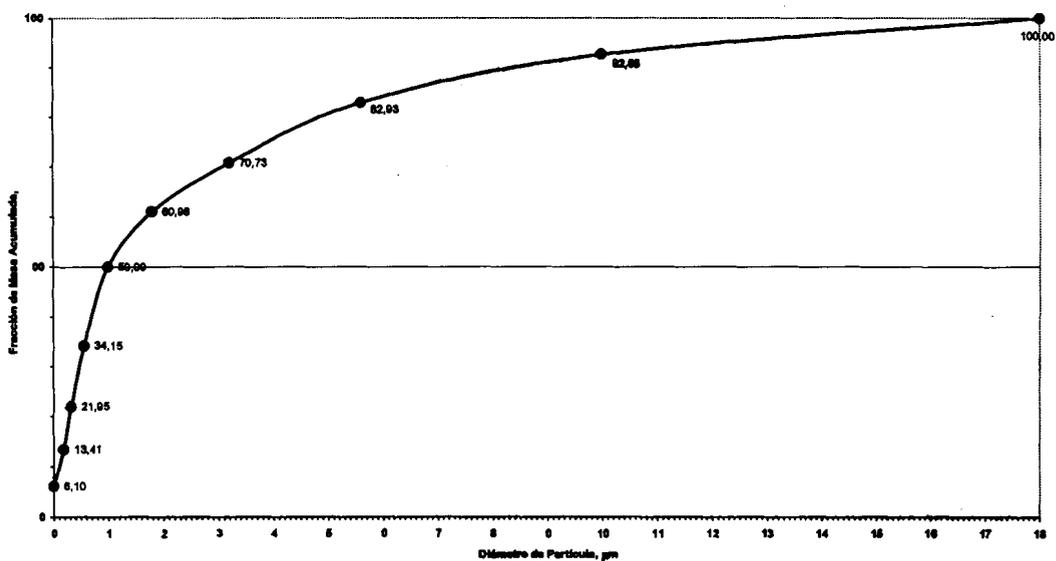
A continuación se presentan los datos y gráficos obtenidos en un día de muestreo en los tres diferentes procesos analizados en esta tesis, los demás datos de medición se encuentran en el apéndice C.

### Trituradora de Yeso



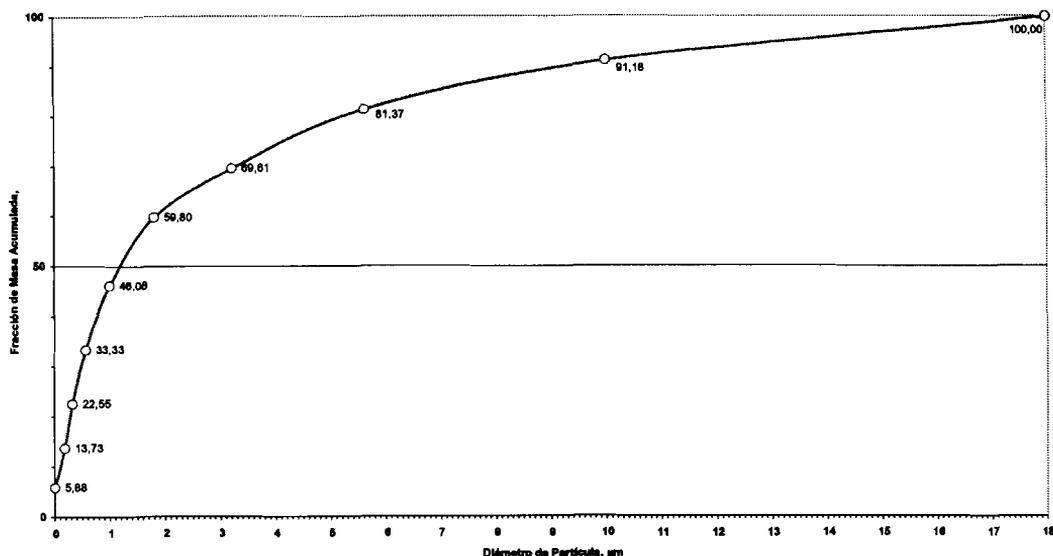
**FIGURA 4.7. DISTRIBUCIÓN DE MASA ACUMULADA EN FUNCION DE SU DIAMETRO 15-05-02**

### Trituradora de Arcilla



**FIGURA 4.8. DISTRIBUCIÓN DE MASA ACUMULADA EN FUNCION DE SU DIAMETRO 10-06-02**

## Trituradora de Caliza



**FIGURA 4.9. DISTRIBUCIÓN DE MASA ACUMULADA EN FUNCION DE SU DIAMETRO 24-06-02**

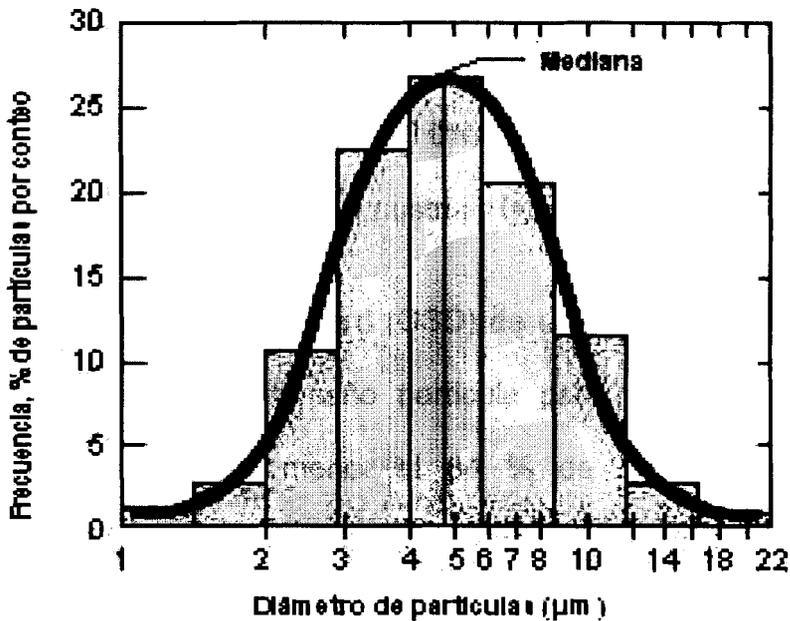
### 4.4. Cálculo de la Media Geométrica y de la Desviación Estándar Geométrica Usando Distribuciones Lognormales.

La mayoría de las distribuciones de tamaño de los aerosoles tienen un rango amplio y una forma sesgada con un extremo alargado para los tamaños grandes.

La distribución normal ampliamente usada no explica de una manera apropiada las distribuciones de tamaño típicas de un aerosol, pero una distribución relacionada, la distribución lognormal, tiene un uso extenso porque grafica de una forma más sencilla las distribuciones de tamaño de aerosol y posee ventajas analíticas.

Para muchas fuentes humanas, la distribución de material particulado es aproximadamente una distribución lognormal. Por lo tanto, es a menudo más fácil trabajar con distribuciones de tamaño de partícula en base logarítmica.

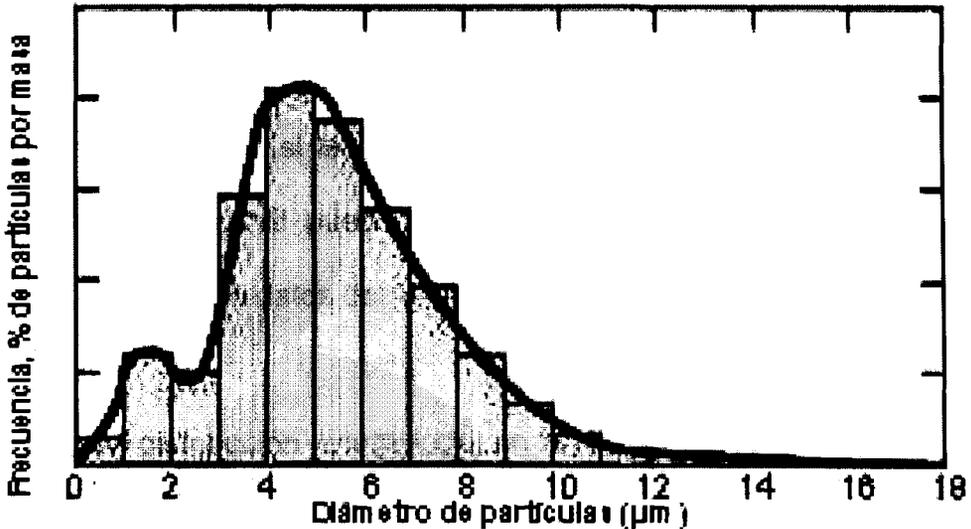
Cuando los diámetros de partícula son graficados en una escala logarítmica se genera una curva en forma de campana. El histograma y la campana que se forma es denominada **curva lognormal**.



**FIGURA 4.10. HISTOGRAMA DE UNA DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL**

Fuente: Particle Size Analysis in Industrial Hygiene, Academic Press, 1971.

La distribución de tamaño de partículas resulta de mecanismos complejos de formación de partículas o mecanismos simultáneos de formación. Estas distribuciones pueden presentar más de un pico (multi-modal).



**FIGURA 4.11. HISTOGRAMA DE UNA DISTRIBUCIÓN BIMODAL**

Fuente: Particle Size Analysis in Industrial Hygiene, Academic Press, 1971.

La desviación geométrica standard (GSD) de una distribución lognormal es determinada dividiendo el tamaño partícula para el 84 % (Diámetro de partícula que es igual o menor al 84 % de la masa presente) de probabilidades para el diámetro de masa medio (MMD) o por dividir el MMD para el tamaño de partícula al 16 % (Diámetro de partícula que es igual o menor al 16 % de la masa presente) de probabilidades.

$$\text{GSD} = \frac{D_{84\%}}{\text{MMD}} = \frac{\text{MMD}}{D_{16\%}} \quad (1)$$

La conversión de las ecuaciones dadas arriba son sólo válidas si la distribución es lognormal o una buena aproximación a una distribución lognormal.

El uso de papel probabilístico simplifica la determinación del MMD y la desviación geométrica standard (GSD). El MMD y la GSD pueden determinarse directamente de una gráfica de datos acumulada del impactador de cascada si la distribución es lognormal, mientras que el 84 percentil, el 16 percentil pueden leerse directamente de la gráfica de la fracción acumulada de datos del impactador.

Al graficar la distribución acumulada en papel probabilístico se obtienen diferentes puntos, se traza una línea entre ellos, dando como resultado una línea recta en lugar de la curva en forma de "S" mostrada en la figura 4.7.

Debido a la rápida expansión de la escala en los extremos, es preferible colocar la línea entre los puntos ubicados entre el 20% al 80% y se pueden despreciar los puntos menores a 10% o mayores al 90%. Si los puntos trazados muestran una marcada diferencia de la forma de una línea recta, aparte de los errores aleatorios sobre la línea, la distribución no es lognormal y la ecuación (1) no puede ser usada.

El MMD puede leerse directamente de esta línea, así como los percentiles 84 o 16, y juntos pueden ser usados para calcular la desviación geométrica (GSD) por medio de la ecuación (1). La ecuación (1) muestra que la GSD está relacionada estrechamente con la pendiente de la línea recta en una gráfica en papel probabilístico.

Si se obtuviera una línea horizontal, esto implicaría que todas las partículas son del mismo tamaño. Por otro lado, una línea muy inclinada (cercana a la vertical) implica una distribución muy amplia.

Un aerosol conformado por dos (o más) fuentes tiene distribuciones de tamaño lognormales diferentes para cada una de las fuentes y es más complicado determinar las dos distribuciones contribuyentes. Si una distribución de tamaño de un aerosol tiene dos picos, esta distribución recibe el nombre de "bimodal". La distribución de tamaño de un aerosol en áreas urbanas es normalmente bimodal.

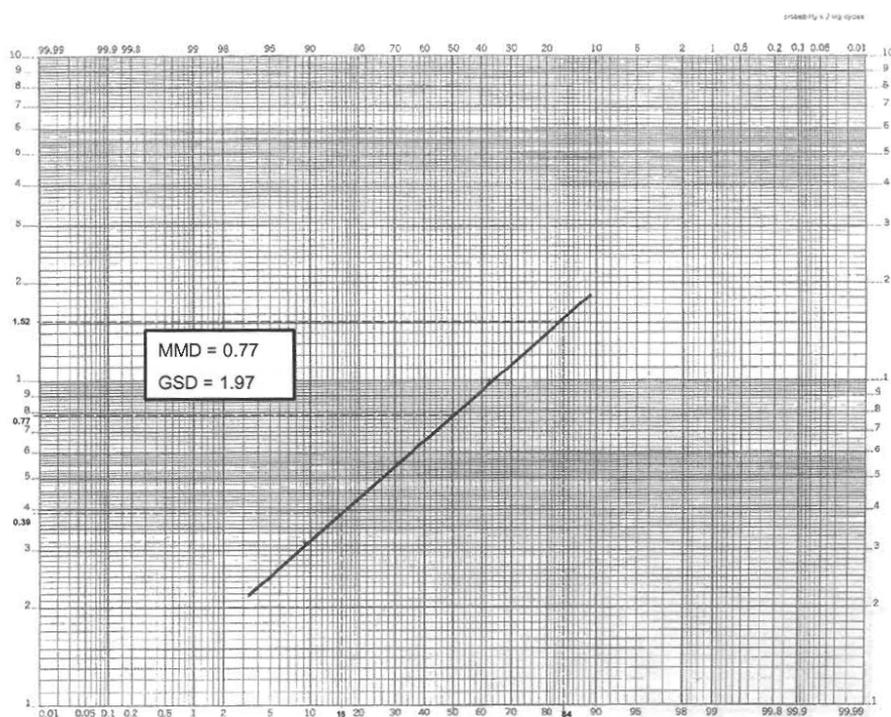
En los casos en que las distribuciones sean de tipo bimodal, la gráfica de los datos en papel probabilístico no darán como resultado una línea recta. Para caracterizar este tipo de datos de tamaño de partícula, es necesario tratar los datos como dos distribuciones lognormales separadas.

El primer grupo corresponde a las partículas denominadas pequeñas, cuyo rango de tamaño está entre 0 a 1  $\mu\text{m}$ , el segundo grupo son las partículas grandes y su rango de tamaño se encuentra entre 1 a 18  $\mu\text{m}$ . A continuación se presentan los gráficos y valores resultantes obtenidos en un día de medición para cada proceso, se presenta el MMD y GSD para los rangos de partículas pequeñas y grandes, los datos restantes se muestran en el apéndice D.

## Trituradora de Yeso

**TABLA 12**  
**DATOS DE DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL**  
**PARTICULAS PEQUEÑAS 15-05-02**

1	2	3	4	5	6	7	8
Etapa	Masa Inicial (mg)	Masa Final (mg)	Diferencia (mg)	Fracción de Masa (%)	ECD (µm)	Rango de Tamaño (µm)	Fracción de masa acumulada (%)
6	0,0783	0,0803	0,0020	37,04	0,56	0.56 - 1	100,00
7	0,0787	0,0804	0,0017	31,48	0,32	0.32 - 0.56	62,96
8	0,0779	0,0791	0,0012	22,22	0,18	0.18 - 0.32	31,48
Filtro	0,0722	0,0727	0,0005	9,26	0	0 - 0.18	9,26
			0,0054	100,00			



**FIGURA 4.12. DISTRIBUCIÓN LOG PROBALISTICA**  
**DE PARTICULAS PEQUEÑAS 15-05-02**

TABLA 13

## DATOS DE DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL

## PARTICULAS GRANDES 15-05-02

1	2	3	4	5	6	7	8
Etapa	Masa Inicial (mg)	Masa Final (mg)	Diferencia (mg)	Fracción de Masa (%)	ECD ( $\mu\text{m}$ )	Rango de Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	Fracción de masa acumulada (%)
0	0,0775	0,0781	0,0006	11,54	18,0	> 18,0	100,00
1	0,0788	0,0795	0,0007	13,46	10	10,0 - 18	88,46
2	0,0785	0,0796	0,0011	21,15	5,6	5,6 - 10,0	75,00
3	0,0773	0,0781	0,0008	15,38	3,2	3,2 - 5,6	53,85
4	0,0781	0,0788	0,0007	13,46	1,8	1,8 - 3,2	38,46
5	0,0779	0,0792	0,0013	25,00	1	1 - 1,8	25,00
			0,0052	100,00			

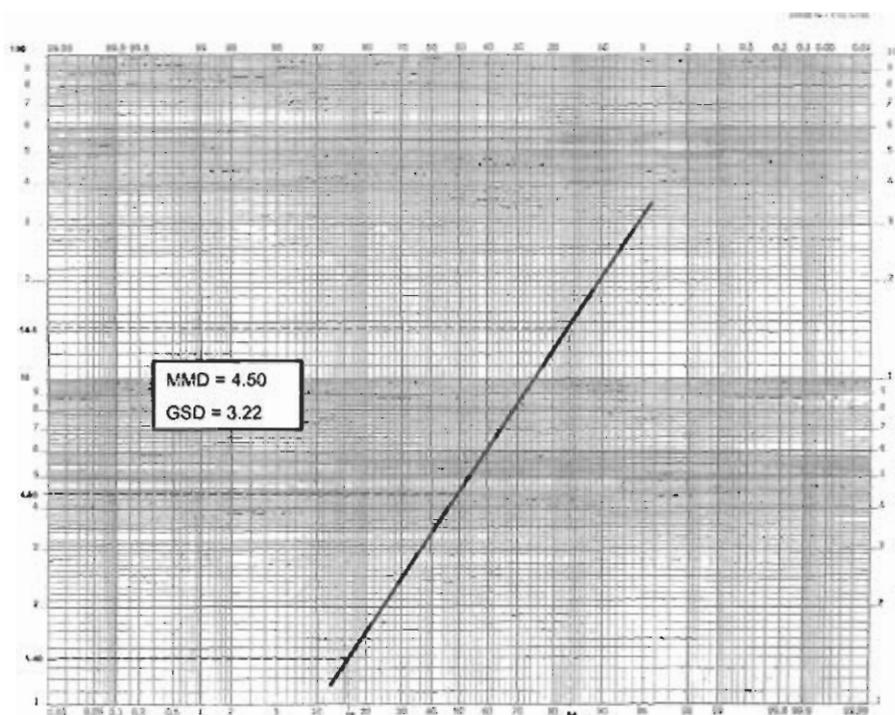
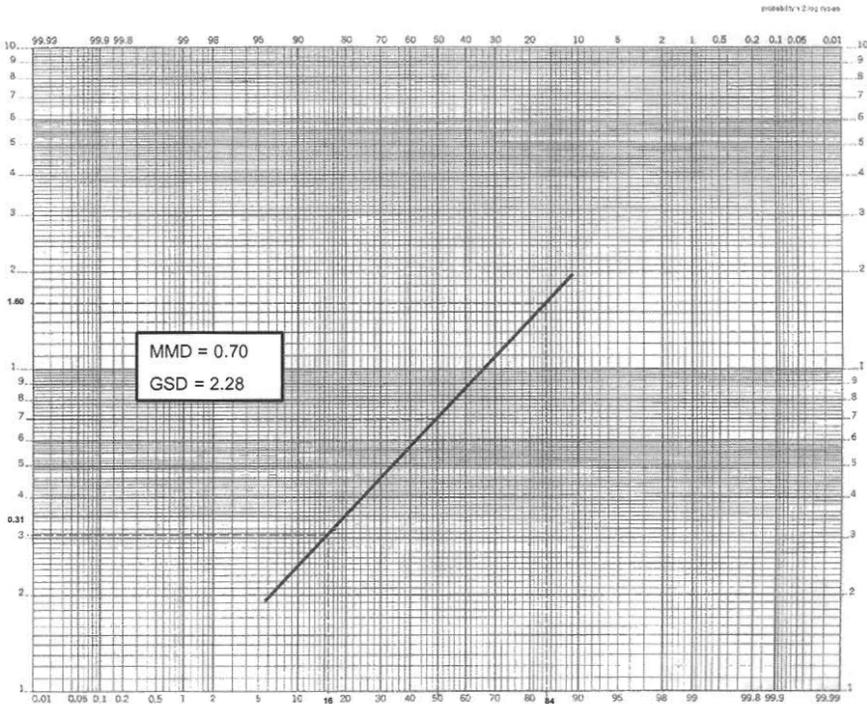


FIGURA 4.13. DISTRIBUCIÓN LOG PROBABILÍSTICA DE PARTICULAS GRANDES 15-05-02

**TABLA 14**  
**DATOS DE DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL**  
**PARTICULAS PEQUEÑAS 10-06-02**

1	2	3	4	5	6	7	8
Etapa	Masa Inicial (mg)	Masa Final (mg)	Diferencia (mg)	Fracción de Masa (%)	ECD (µm)	Rango de Tamaño (µm)	Fracción de masa acumulada (%)
6	0,0776	0,0786	0,0010	35,71	0,56	0,56 - 1	100,00
7	0,0787	0,0794	0,0007	25,00	0,32	0,32 - 0,56	64,29
8	0,0788	0,0794	0,0006	21,43	0,18	0,18 - 0,32	39,29
Filtro	0,0720	0,0725	0,0005	17,86	0	0 - 0,18	17,86
			0,0028	100,00			



**FIGURA 4.14. DISTRIBUCIÓN LOG PROBABILÍSTICA**  
**DE PARTICULAS PEQUEÑAS 10-06-02**

TABLA 15

## DATOS DE DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL

## PARTICULAS GRANDES 10-06-02

1	2	3	4	5	6	7	8
Etapa	Masa Inicial (mg)	Masa Final (mg)	Diferencia (mg)	Fracción de Masa (%)	ECD ( $\mu\text{m}$ )	Rango de Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	Fracción de masa acumulada (%)
0	0,0781	0,0787	0,0006	11,11	18,0	> 18,0	100,00
1	0,0778	0,0786	0,0008	14,81	10	10,0 - 18	88,89
2	0,0783	0,0793	0,0010	18,52	5,6	5,6 - 10,0	74,07
3	0,0787	0,0795	0,0008	14,81	3,2	3,2 - 5,6	55,56
4	0,0778	0,0787	0,0009	16,67	1,8	1,8 - 3,2	40,74
5	0,0781	0,0794	0,0013	24,07	1	1 - 1,8	24,07
			0,0054	100,00			

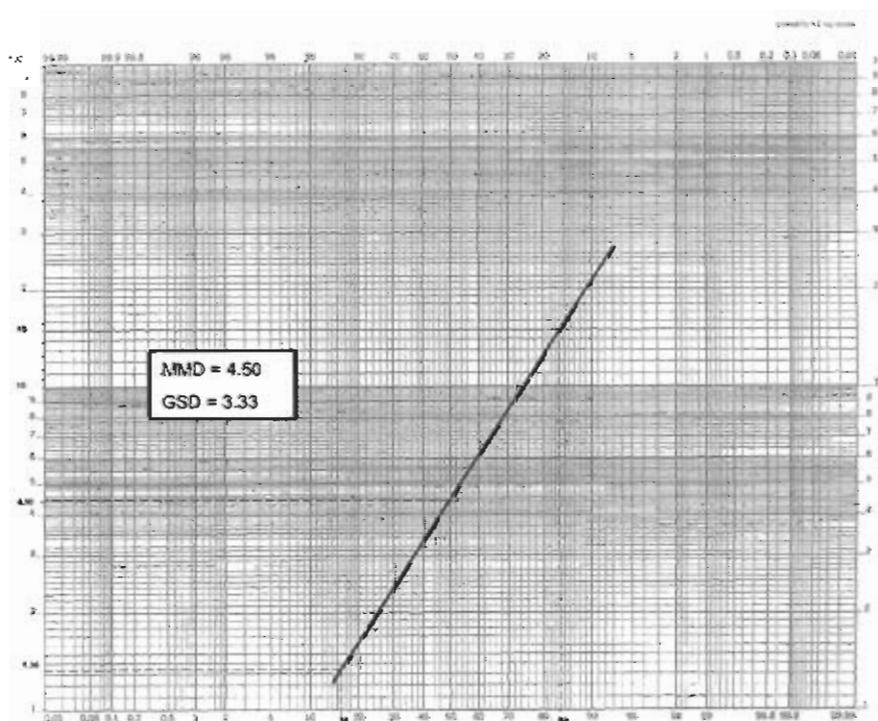
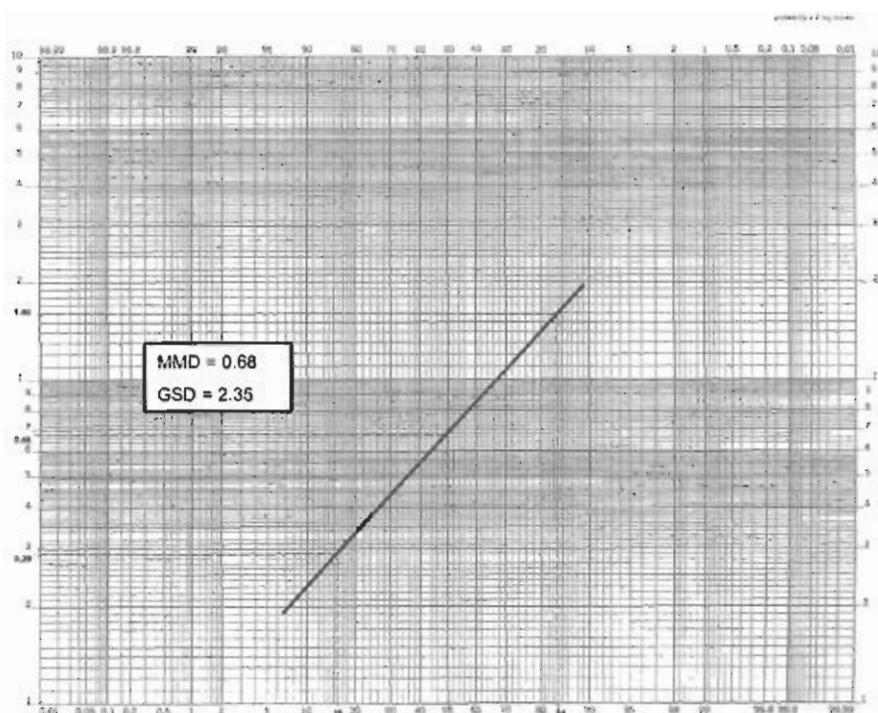


FIGURA 4.15. DISTRIBUCIÓN LOG PROBALISTICA DE PARTICULAS GRANDES 10-06-02

## Trituradora de Caliza

**TABLA 16**  
**DATOS DE DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL**  
**PARTICULAS PEQUEÑAS 24-06-02**

1	2	3	4	5	6	7	8
Etapa	Masa Inicial (mg)	Masa Final (mg)	Diferencia (mg)	Fracción de Masa (%)	ECD ( $\mu\text{m}$ )	Rango de Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	Fracción de masa acumulada (%)
6	0,0776	0,0787	0,0011	32,35	0,56	0.56 - 1	100,00
7	0,0787	0,0796	0,0009	26,47	0,32	0.32 - 0.56	67,65
8	0,0788	0,0796	0,0008	23,53	0,18	0.18 - 0.32	41,18
Filtro	0,0720	0,0726	0,0006	17,65	0	0 - 0.18	17,65
			0,0034	100,00			



**FIGURA 4.16. DISTRIBUCIÓN LOG PROBALISTICA**  
**DE PARTICULAS PEQUEÑAS 24-06-02**

TABLA 17 La Fracción PM<sub>10</sub>

obtener una distribución de tamaño con un  
 DATOS DE DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL  
 os que la masa de la fracción respirable puede  
 cualquier momento.

1	2	3	4	5	6	7	8
Etapa	Masa Inicial (mg)	Masa Final (mg)	Diferencia (mg)	Fracción de Masa (%)	ECD (µm)	Rango de Tamaño (µm)	Fracción de masa acumulada (%)
0	0,0781	0,0790	0,0009	13,24	18,0	> 18.0	100,00
1	0,0778	0,0788	0,0010	14,71	10	10.0 - 18	86,76
2	0,0783	0,0795	0,0012	17,65	5,6	5.6 - 10.0	72,06
3	0,0787	0,0797	0,0010	14,71	3,2	3.2 - 5.6	54,41
4	0,0778	0,0792	0,0014	20,59	1,8	1.8 - 3.2	39,71
5	0,0781	0,0794	0,0013	19,12	1	1 - 1.8	19,12
			0,0068	100,00			

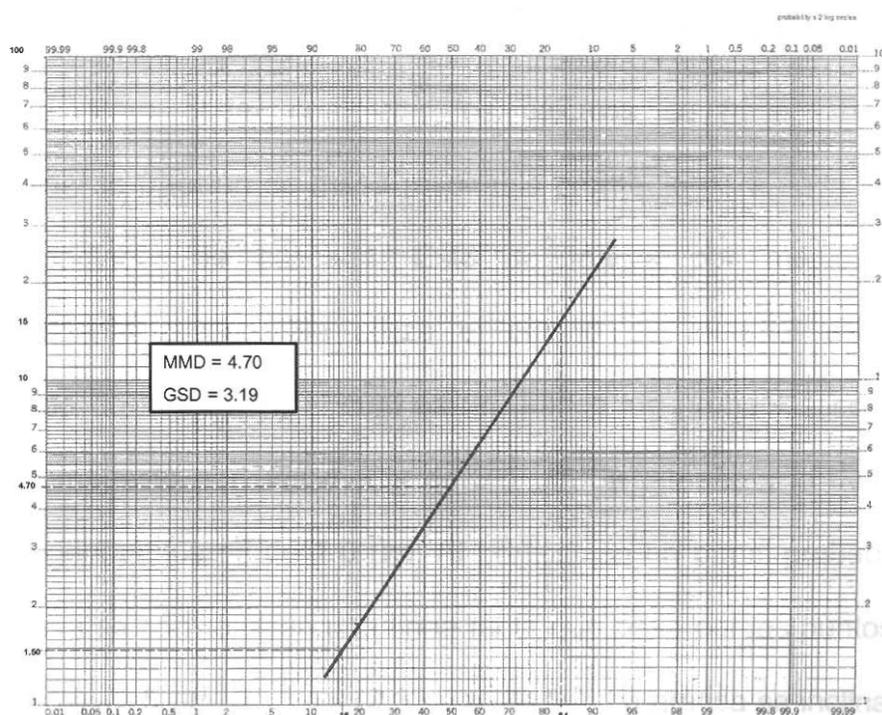


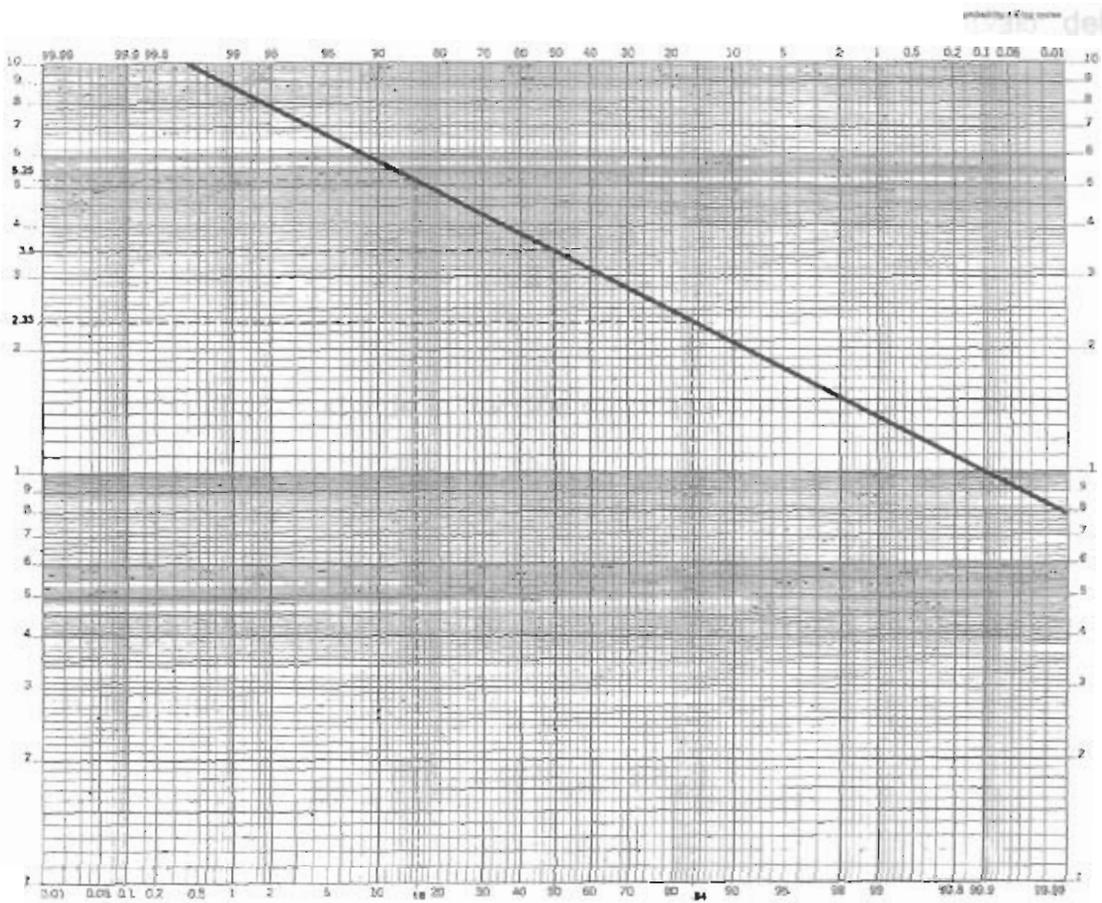
FIGURA 4.17. DISTRIBUCIÓN LOG PROBALISTICA  
 DE PARTICULAS GRANDES 24-06-02

#### 4.5. Cálculo de Fracción Respirable y de la Fracción $PM_{10}$

Una de las ventajas de obtener una distribución de tamaño con un impactador de cascada es que la masa de la fracción respirable puede ser calculada en cualquier momento.

Esta es calculada por medio de un método que combina los cálculos con la parte gráfica. Métodos similares pueden ser utilizados para calcular otras sub fracciones de masa como la fracción de material particulado torácica o fracción  $PM_{10}$ .

Las tres primeras columnas de la tabla 19 son las columnas (1), (2), y (9) de la tabla 6 calculadas con los datos obtenidos con el impactador de cascada. Para poder completar los cálculos se hace necesario determinar la fracción de masa respirable promedio para cada intervalo del impactador de cascada. Esto se realiza por medio de un procedimiento gráfico. Se utiliza el criterio de material particulado respirable de la ACGIH, el cual es un gráfico log probabilístico (Figura 4.18) compuesto por una media de  $3.5 \mu m$  de tamaño y la desviación normal geométrica es de  $1.5 \mu m$ . Al graficar en un papel probabilístico, esta curva se convierte en una línea recta que pasa por los puntos ( $5.25 \mu m$ , 16 %), ( $3.5 \mu m$ , 50 %) y ( $2.33 \mu m$ , 84 %). La gráfica se inclina abajo hacia la derecha porque la fracción respirable decrece cuando el tamaño de la partícula aumenta.



**FIGURA 4.18. MATERIAL PARTICULADO RESPIRABLE  
SEGÚN CRITERIO DE LA ACGIH**

La fracción respirable para cualquier tamaño de partícula se obtiene directamente del gráfico leyendo el porcentaje que corresponde a un tamaño dado. Así 4.5% de las partículas de  $7\ \mu\text{m}$  y 91.5% de las partículas de  $2\ \mu\text{m}$  son respirables según este criterio. Para evitar confusión es mejor convertir estos porcentajes a fracción dividiendo para 100. El promedio de la fracción respirable para cada fase, columna (6) en la tabla 18, puede calcularse de dos maneras. La manera más sencilla es tomar el promedio de las fracciones

respirables para los límites superior e inferior de cada intervalo del impactador de cascada,

$$\overline{RF} = \frac{(RF_{LL} + (RF_{UL}))}{2} \quad (2)$$

donde RF es el promedio de la fracción respirable para el intervalo, RF<sub>LL</sub> es la fracción respirable en el límite menor de un intervalo y RF<sub>UL</sub> es la fracción respirable en el límite mayor del mismo intervalo. Un procedimiento ligeramente más complicado y generalmente más exacto es basado en la regla de Simpson.

$$\overline{RF} = \frac{(RF_{LL} + 4(RF_{MP}) + RF_{UL})}{6} \quad (3)$$

Donde RF<sub>MP</sub> es la fracción respirable para el punto medio del intervalo. La columna (6) es el producto entre la columna (4) y la columna (5) para cada fila y representa el porcentaje de la masa total que es respirable para cada intervalo de tamaño.

Con la ecuación 2 y la figura 4.18 se procede a crear una tabla en la cual se anotará la fracción respirable para los límites inferior y superior de cada intervalo, con estos dos datos se obtiene la fracción respirable promedio para cada intervalo de partícula, la tabla que contiene los valores se muestra a continuación.

**TABLA 18**  
**FRACCION RESPIRABLE PROMEDIO**

intervalo	fracción límite inferior %	fracción límite superior %	fracción límite inferior	fracción límite superior	promedio fracción respirable
> 18.0	0	0	0	0	0
10.0 - 18	0,4	0	0,004	0	0,002
5.6 - 10.0	16	0,4	0,16	0,004	0,082
3.2 - 5.6	58	16	0,58	0,16	0,37
1.8 - 3.2	93	58	0,93	0,58	0,755
1 - 1.8	99,9	93	0,999	0,93	0,965
0.56 - 1	100	99,9	1	0,999	0,9995
0.32 - 0.56	100	100	1	1	1
0.18 - 0.32	100	100	1	1	1
0 - 0.18	100	100	1	1	1

Con esta tabla se puede calcular el porcentaje de masa respirable para cada intervalo de tamaño, este valor se obtiene al multiplicar la fracción de masa (columna 3) por la fracción respirable promedio (columna 4), la fracción de masa respirable total se obtiene al sumar las masas respirables parciales de cada intervalo. El total de la columna (5) es la fracción respirable del aerosol, 71.41 % para el caso de la trituradora de yeso.

Por otro lado la fracción  $PM_{10}$  se calcula de una forma similar, en este caso se suman las fracciones parciales de todos los intervalos menores a  $10 \mu m$ . El total de la columna (7) es la fracción  $PM_{10}$  del aerosol, correspondiente al 71.39 % para la trituradora de yeso, lo cual se muestra en la tabla 19. Los valores para los días restantes están en el apéndice E.

## Trituradora de Yeso

TABLA 19

## FRACCION RESPIRABLE Y FRACCION PM 10 (15-05-02)

1	2	3	4	5	6	7
Etapa	Rango de Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	Fracción de Masa (%)	Fracción respirable promedio (fr)	Masa Respirable (%)	Fracción PM 10 promedio (fr)	Masa PM 10 (%)
0	> 18.0	5,66	0,000	0,00	-	-
1	10.0 - 18	6,60	0,002	0,01	-	-
2	5.6 - 10.0	10,38	0,082	0,85	0,082	0,85
3	3.2 - 5.6	7,55	0,370	2,79	0,370	2,79
4	1.8 - 3.2	6,60	0,755	4,99	0,755	4,99
5	1 - 1.8	12,26	0,965	11,83	0,965	11,83
6	0.56 - 1	18,87	1,000	18,86	1,000	18,86
7	0.32 - 0.56	16,04	1,000	16,04	1,000	16,04
8	0.18 - 0.32	11,32	1,000	11,32	1,000	11,32
Filtro	0 - 0.18	4,72	1,000	4,72	1,000	4,72
		100,0		71,41		71,39

## Trituradora de Arcilla

TABLA 20

## FRACCION RESPIRABLE Y FRACCION PM 10 (10-06-02)

1	2	3	4	5	6	7
Etapa	Rango de Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	Fracción de Masa (%)	Fracción respirable promedio (fr)	Masa Respirable (%)	Fracción PM 10 promedio (fr)	Masa PM 10 (%)
0	> 18.0	7,32	0,000	0,00	-	-
1	10.0 - 18	9,76	0,002	0,02	-	-
2	5.6 - 10.0	12,20	0,082	1,00	0,082	1,00
3	3.2 - 5.6	9,76	0,370	3,61	0,370	3,61
4	1.8 - 3.2	10,98	0,755	8,29	0,755	8,29
5	1 - 1.8	15,85	0,965	15,29	0,965	15,29
6	0.56 - 1	12,20	1,000	12,19	1,000	12,19
7	0.32 - 0.56	8,54	1,000	8,54	1,000	8,54
8	0.18 - 0.32	7,32	1,000	7,32	1,000	7,32
Filtro	0 - 0.18	6,10	1,000	6,10	1,000	6,10
		100,0		62,35		62,33

## Trituradora de Caliza

TABLA 21

## FRACCION RESPIRABLE Y FRACCION PM 10 (24-06-02)

1	2	3	4	5	6	7
Etapa	Rango de Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	Fracción de Masa (%)	Fracción respirable promedio (fr)	Masa Respirable (%)	Fracción PM 10 promedio (fr)	Masa PM 10 (%)
0	> 18.0	8,82	0,000	0,00	-	-
1	10.0 - 18	9,80	0,002	0,02	-	-
2	5.6 - 10.0	11,76	0,082	0,96	0,082	0,96
3	3.2 - 5.6	9,80	0,370	3,63	0,370	3,63
4	1.8 - 3.2	13,73	0,755	10,36	0,755	10,36
5	1 - 1.8	12,75	0,965	12,29	0,965	12,29
6	0.56 - 1	10,78	1,000	10,78	1,000	10,78
7	0.32 - 0.56	8,82	1,000	8,82	1,000	8,82
8	0.18 - 0.32	7,84	1,000	7,84	1,000	7,84
Filtro	0 - 0.18	5,88	1,000	5,88	1,000	5,88
		100,0		60,60		60,58

# CAPÍTULO 5

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

Las gráficas de las concentraciones que se obtuvieron son de tipo bimodal, un modo corresponde a la fracción fina ( $MP < 2.5 \mu m$ ), mientras que el segundo modo representa la fracción gruesa ( $MP > 2.5 \mu m$ ). En los días de medición con producción los niveles de concentración de material particulado fino es mayor que las partículas gruesas. Mientras que los resultados que se obtuvieron en los días de descanso, dieron como resultado una distribución bimodal en la cual la fracción de material grueso superó en concentración a la fracción fina.

Durante los días con producción los niveles de material particulado fino se incrementan debido al aporte de partículas de diferentes

---

tamaños, producidas por los procesos de trituración de material, al medir en un día no laborable el nivel de material particulado fino disminuye debido a que no está actuando la fuente que lo genera, el nivel de material grueso aumenta en los días no laborables debido a que las partículas de mayor tamaño son aportadas por fuentes naturales, las cuales siguen actuando.

Los resultados obtenidos por medio del muestreo permitirán construir modelos de la calidad del aire para predecir la evolución de la distribución de tamaño y la composición de las partículas finas y gruesas en la atmósfera.

### **Concentraciones de Material Particulado**

#### **Yeso**

Al analizar los resultados consolidados de la medición de yeso se puede determinar que la concentración durante el primer día laborable de muestreo fue de  $736.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , de esta cantidad el 68.6 % pertenece a la fracción fina, la mayor concentración de material pertenece al intervalo 0.56 a  $1.0 \mu\text{m}$ , este valor es de  $138.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En la fracción de material particulado grueso  $\text{PM} > 2.5 \mu\text{m}$  el rango de mayor concentración es 5.6 a  $10 \mu\text{m}$ , alcanzando un valor de  $76.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En el segundo día laborable el 70.7 % de la muestra pertenece a material fino, la máxima concentración se encuentra en el rango 0.56 a  $1.0 \mu\text{m}$ , con un valor de  $187.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En lo que respecta al material particulado grueso la mayor concentración fue de  $97.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$  perteneciente al intervalo 5.6 a  $10.0 \mu\text{m}$ . La concentración total fue de  $972.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Finalmente durante el día no laborable, la concentración total fue de  $312.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , la mayor concentración de material particulado se encuentra en la fracción fina con un 53.33 %, el intervalo donde se registró la mayor concentración fue el de 0.56 a  $1.0 \mu\text{m}$ , con una concentración de  $41.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . El material particulado grueso registró la mayor concentración en el intervalo 3.2 a  $5.6 \mu\text{m}$  con un valor de  $55.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En el caso de la trituradora de yeso se puede anotar que existe mayor cantidad de concentración de material particulado, debido a la naturaleza misma del yeso que tiene una consistencia más fina que la arcilla y la caliza. Así también el nivel de  $\text{MP} < 2.5 \mu\text{m}$  es mayor en el yeso.

### **Caliza**

Durante las mediciones realizadas en el primer día laborable la concentración total fue de  $708.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , el 59.8 % de este material pertenece a la fracción fina, correspondiendo al intervalo de 1.8 a  $3.2 \mu\text{m}$  la mayor concentración con un valor de  $97.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En lo que respecta al material particulado grueso el rango de mayor concentración es 5.6 a  $10 \mu\text{m}$ , alcanzando un valor de  $83.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En el segundo día laborable la muestra alcanzó una concentración de 972.22  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , el 60.7 % de toda la muestra pertenece a material fino, la concentración máxima se encuentra en el rango 1.8 a 3.2  $\mu\text{m}$ , con un valor de 125.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . En lo que respecta al material particulado grueso la mayor se ubicó en el intervalo 5.6 a 10.0  $\mu\text{m}$  con una concentración de 111.11  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En lo que respecta al día no laborable, la mayor concentración de material particulado se encuentra en la fracción gruesa con un 50.96 %, el intervalo donde se registró la mayor concentración fue el de 5.6 a 10  $\mu\text{m}$ , con una concentración de 48.61  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . El material particulado fino registró la mayor concentración en el intervalo 1 a 1.8  $\mu\text{m}$  con un valor de 34.72  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . El total de la muestra colectada fue de 313.40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

### **Arcilla**

En lo referente a la medición de arcilla se pudo determinar que el 60.98 % del material muestreado durante el primer día laborable pertenece a la fracción fina, la mayor concentración de material pertenece al intervalo 1.0 a 1.8  $\mu\text{m}$ , este valor es de 90.28  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En la fracción de material particulado grueso el rango de mayor concentración es 5.6 a 10  $\mu\text{m}$ , alcanzando un valor de 69.44  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Durante este día se colectó en total 569.44  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Durante el segundo día laborable la cantidad de muestra colectada fue de  $652.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , el 62.77 % de la muestra pertenece a material fino, la máxima concentración se encuentra en el rango 1.0 a  $1.8 \mu\text{m}$ , con un valor de  $97.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En lo que respecta al material particulado grueso la mayor concentración fue de  $76.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$  perteneciente al intervalo 5.6 a  $10.0 \mu\text{m}$ .

En el día no laborable, la cantidad total de material colectado fue de  $332.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , la mayor concentración de material particulado se encontró en la fracción fina con un 58.25 %, el intervalo donde se registró la mayor concentración fue el de 1.0 a  $1.8 \mu\text{m}$ , con una concentración de  $41.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

El material particulado grueso registró la mayor concentración en el intervalo 5.6 a  $10 \mu\text{m}$  con un valor de  $48.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . El yeso fue el material que alcanzó los mayores niveles de concentración de material particulado, la caliza alcanzó niveles muy parecidos al yeso, y finalmente la arcilla.

La concentración de material particulado fino en el caso del yeso alcanza su máxima concentración en el intervalo 0.56 a  $1.0 \mu\text{m}$ , por otro lado la concentración de material particulado grueso alcanza su máxima concentración para el intervalo 5.6 a  $10 \mu\text{m}$ . Para la caliza la máxima concentración de material particulado fino se alcanza en el rango 1.0 a  $1.8 \mu\text{m}$ , mientras que la mayor cantidad de material particulado grueso se encuentra en el intervalo 5.6 a  $10 \mu\text{m}$ .

En el caso de la arcilla el rango que mayor concentración de material particulado fino es el correspondiente a 1.0 a 1.8  $\mu\text{m}$ , la mayor concentración de material particulado grueso se encuentra en el intervalo 5.6 a 10  $\mu\text{m}$ .

Como se puede apreciar en los resultados arriba mostrados los rangos de tamaño del material particulado fino varían, el yeso alcanza su punto máximo en el rango más fino en comparación a los otros dos productos.

El material particulado grueso no varía para los tres procesos analizados, esto se debe a que existen dos fuentes que aportan partículas al aire, las actividades antropogénicas aportan en su mayoría el material particulado fino, el material grueso es aportado por fuentes de tipo natural.

Lo único que varía en los tres puntos de medición es el material sometido al proceso de trituración, es por esto que el material particulado grueso se mantiene en el mismo rango para los tres casos.

La arcilla tiene concentraciones menores de partículas finas en comparación con las otras dos sustancias, debido a que el tamaño de las partículas son de un diámetro promedio mayor, otro factor importante es que la arcilla contiene un determinado grado de humedad, lo cual impide en cierta forma que una parte del material particulado se eleve hacia la atmósfera. Por otro lado, la arcilla tiene una mayor cantidad de partículas gruesas.

Algo importante de resaltar es que durante los días no laborables la mayor concentración de material particulado fue del proceso de trituración de arcilla, esto se debe a la cercanía del punto a un camino no pavimentado, por lo que una gran cantidad de las partículas que se generan por la circulación de los vehículos pasaron al MOUDI.

### **Gráficas de Probabilidad Logarítmica**

Los procedimientos para analizar los datos obtenidos por un impactador de cascada van desde lo sencillo y directo hasta lo complejo. Para la mayoría de las situaciones la tabulación de resultados con la graficación en papel probabilístico proporcionó información de distribución de tamaño exacta y útil.

Las ventajas de usar una gráfica de probabilidad logarítmica para mostrar los datos del impactador de una distribución lognormal son: estimación directa de MMD; estimación directa de la distribución lognormal; cálculo simple de la GSD; cálculo directo de CMD y otros parámetros de distribuciones de tamaño que usan el MMD y GSD; y construcción simple de las líneas de distribución de tamaño.

Las desventajas son: la pérdida de detalles con la escala logarítmica; el 100% de los puntos no pueden graficarse, los errores de expansión en los extremos y como en todas las distribuciones acumuladas, una medición errónea puede afectar todos los datos.

---

## **Niveles de Fracción Respirable**

El yeso es el material que tiene una mayor cantidad de partículas respirables, incluso durante un día sin producción existe un nivel alto de partículas pequeñas en el aire, esto se debe a que este tipo de partículas tiene una mayor tendencia a mantenerse flotando en el ambiente por las pequeñas corrientes de viento en el sector. Es interesante anotar que la fracción respirable de la arcilla resultó mayor que el de la caliza, siendo notorio el incremento en el día no laborable, esto aparentemente no debería ser así debido a la naturaleza de los dos materiales, sin embargo al revisar la ubicación de los puntos de muestreo (MAPA 1), se puede notar la presencia de una vía de acceso no pavimentada a escasos metros del lugar, esta vía es una fuente fugitiva de material particulado, el cual pasa a ser parte de la muestra. A continuación se detalla los hallazgos realizados luego de los muestreos:

### **Yeso**

La fracción respirable del yeso durante el primer día de muestreo fue del 71.41 %, este porcentaje corresponde al material respirable de toda la muestra durante el primer día laborable, alrededor del 62.76 % del material muestreado corresponde a una tamaño menor a 2.5  $\mu\text{m}$ , que es la fracción de mayor peligro para los trabajadores. En el segundo día laborable la fracción respirable alcanzó el 72.2 % de la muestra, el 64.28 % corresponde a la fracción menor a 2.5  $\mu\text{m}$ .

Durante el día no laborable, la fracción respirable alcanzó un 65.29 %, del total de la masa colectada durante este día el 57.51 % corresponde a partículas de tamaño menor a 2.5  $\mu\text{m}$ .

### **Caliza**

En las mediciones realizadas en el primer día laborable el 60.6 % del material es respirable, del total de la muestra el 45.62 % es menor a 2.5  $\mu\text{m}$ . Para el segundo día laborable el 61.78 % de toda la muestra pertenece a la fracción respirable y el 47.42 % al rango de 0 a 2.5  $\mu\text{m}$ . En lo que respecta al día no laborable, el nivel de material particulado respirable fue de 51.35 %, correspondiendo a un 37.59 % la fracción de tamaño menor a 2.5  $\mu\text{m}$ .

### **Arcilla**

En la medición de arcilla se pudo determinar que el 62.35 % del material muestreado durante el primer día laborable pertenece a la fracción respirable, con un 49.43 % de las partículas pertenecientes a un tamaño menor a 2.5  $\mu\text{m}$ . Para el segundo día laborable el 64.14 % de la muestra pertenece a la fracción respirable, y un 51.59 % del material colectado es menor a 2.5  $\mu\text{m}$ .

En lo referente al día no laborable, el 59.55 % de la muestra pertenece a la fracción respirable y un 47.36 % es menor a 2.5  $\mu\text{m}$ . Algo importante a destacar es que este equipo sirve para realizar estudios de material

respirable, analizando el tamaño de los aerosoles, por lo que a pesar de poder capturar partículas de tamaño menor a  $10\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) y menor a  $2.5\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ).

El equipo no puede trabajar 24 horas continuas, por este hecho, no es aplicable para cumplir con la Norma de Calidad del Aire Ambiente de la República del Ecuador, la cual se basa en la medición de concentraciones de material particulado  $\text{PM}_{10}$  y material particulado  $\text{PM}_{2.5}$ .

### **Errores potenciales de pesaje**

Pueden existir errores en el pesaje de los substratos, estos errores dependen de la naturaleza de material del substrato, condiciones de temperatura y humedad relativa y métodos de manejo de las muestras así como la precisión de la balanza utilizada.

Como en todo proceso de muestreo, pueden existir fuentes potenciales de error que inciden en los resultados de la experimentación, por este motivo se debe tener en consideración los siguientes factores:

*Partículas Volátiles.*- Estas partículas son colectadas por los substratos y filtro, pero a menudo ocurre que se pierden durante el transporte y/o almacenamiento de los filtros, previo a la determinación de su peso posterior a la medición.

*"Artefactos"*.- Errores en la medición de concentración pueden resultar de la retención de especies gaseosas en los filtros. Estos errores incluyen la retención de dióxido de azufre y ácido nítrico, este fenómeno se incrementa con el aumento de alcalinidad en los filtros. Por esta razón al momento de escoger un filtro se debe tomar en cuenta que este posea una baja alcalinidad.

En este estudio, la contribución principal de material particulado colectado en los filtros es polvo primario proveniente de procesos mecánicos usados en la transformación de la materia prima, por lo que la pérdida de material volátil y la formación de artefactos debe ser despreciable comparada con la masa total colectada.

*Humedad*.- Los efectos de la humedad del aire ambiente son inevitables. En esta experimentación se ha seguido el procedimiento descrito por la referencia citada USEPA, FR. VOL. 52 No. 126, el cual recomienda equilibrar cada filtro en el ambiente acondicionado para determinación de peso, por un período de al menos 24 horas, antes y después de cada medición. Durante mediciones de prueba que se realizaron antes del muestreo final, los filtros no fueron puestos en cuarentena para equilibrar la humedad relativa de los mismos, lo cual dio como resultado mediciones erróneas, llegando en algunos casos a obtenerse valores menores al peso inicial del filtro intacto. Una vez que se tomó en cuenta este factor los resultados fueron coherentes.

*Manipulación de Filtros.*- Los filtros fueron manipulados con las pinzas provistas por el fabricante de la balanza analítica, y se trató de protegerlos en todo momento del polvo del aire ambiente, cuando fue necesario exponerlos por razones de operación, pesaje y almacenamiento.

En las electrobalanzas modernas con sensibilidades tan bajas un error de pesaje de pocos microgramos tiene un efecto mucho mayor en los extremos de la distribución. Si los errores de pesaje son aleatorios y hay suficientes puntos para graficar, el efecto global es ligero, el error es mayor en los extremos de la curva y menor en el centro. Estos errores darán como resultado un cambio significativo en la GSD.

*Cargas Electroestáticas.*- Las cargas electrostáticas en las partículas puede influir en el pesaje de las muestras, incrementando o disminuyendo el peso de la misma, esto se debe a que las partículas sobre cada substrato pueden atraer o repeler partículas que se encuentren suspendidas en el aire del lugar donde se realiza el pesaje. Este problema se solucionó con la utilización de una barra de Polonio 210, con la cual se eliminó la ionización del aire.

### **Pérdidas entre etapas**

Las pérdidas entre cada fase son causadas por partículas que se depositan en los conductos entre las fases en lugar de las placas de impacto. Esto viola la noción básica que toda la masa es distribuida entre las diferentes fases.

Este error es más complicado por el hecho que las pérdidas entre etapas son mayores para las partículas más grandes y menores para las partículas más pequeñas.

Por consiguiente las pérdidas entre etapas son principalmente un problema en las primeras fases. Esto ocasiona una reducción en la fracción de masa conformada por las partículas grandes. Si el método analítico y el material del aerosol lo permiten, la mejor manera de resolver este problema es recuperar el material perdido y agregarlo a la fase siguiente de la etapa donde fue depositado.

Si las curvas de pérdida entre etapas versus el tamaño de la partícula están disponibles, es posible corregir este error pero se requiere estimar la distribución de tamaño después de cada fase y luego estimar la pérdida para cada fracción de tamaño antes de la siguiente fase. El MOUDI MSP 100 ha sido diseñado para minimizar estas pérdidas, y estos errores pueden ignorarse a menudo.

La limitación principal de los impactadores de cascada es que sólo una cantidad pequeña de material particulado puede ser recolectada sobre cada substrato. Los impactadores de cascada tienen una tendencia a favor de las partículas debido a la elasticidad y re encauzamiento de las partículas, y debido a la fractura de las partículas mayores durante la impactación.

La determinación de distribuciones de tamaño de aerosol puede ser una herramienta de la investigación poderosa al estudiar contribuciones de la fuente y procesos de la transformación.

## **5.2. Recomendaciones**

Una vez concluido el análisis de la muestra colectada y existiendo en las tres fuentes un alto porcentaje de material respirable, el cual puede resultar nocivo para el trabajador si se expone durante largos períodos, se recomienda proveer a los trabajadores de mascarillas que puedan retener partículas menores a 2.5  $\mu\text{m}$ .

Después de haber realizado el análisis físico y la distribución de tamaño del material particulado, es recomendable realizar un análisis químico del mismo, con este tipo de estudio se puede entender la composición química de los aerosoles en los diferentes ambientes de trabajo y proporcionará información valiosa para la protección del medio ambiente en términos de determinar la contribución relativa de varias fuentes a la contaminación atmosférica.

Se debe continuar realizando muestreos para obtener una base de datos de la calidad del aire en los puntos analizados, con la finalidad de establecer escalas y tendencias de contaminación atmosférica. El conocimiento de la distribución de tamaño de partículas generadas por

el proceso de trituración de los diferentes materiales es importante para diseñar un sistema apropiado para filtración o captación de partículas.

Los datos de obtenidos en este estudio serán útiles para diseñar filtros apropiados para el uso en la industria de trituración de minerales. Se recomienda utilizar este equipo para evaluar la eficiencia de equipos captadores de partículas ya existentes (filtros de mangas, colectores de polvo, separadores de material particulado), de este manera se podrá determinar si los filtros en funcionamiento cumplen con los objetivos planteados, de no ser así se podría rediseñar estos sistemas o de ser necesario construir un equipo nuevo que cumpla con los requerimientos necesarios para preservar la salud de los trabajadores.

El MOUDI MSP 100 sirve para muestreos de calidad del aire o de exposición personal en interiores o exteriores, el muestreo fraccionado o por tamaño de partículas es más apropiado para evaluar efectos en la salud y compararlo con las recomendaciones que indica la OMS. Existen otro tipo de aplicaciones en las cuales se pueden utilizar los impactadores de cascada, algunas de las más importantes son descritas a continuación:

**Análisis de bioaerosoles.-** Las muestras colectadas deben ser analizadas para determinar y caracterizar bioaerosoles libres en el aire, además se puede detallar la composición bioquímica del material particulado y poder

verificar la existencia de especies orgánicas (polen, hongos, bacterias, etc.) en el aerosol.

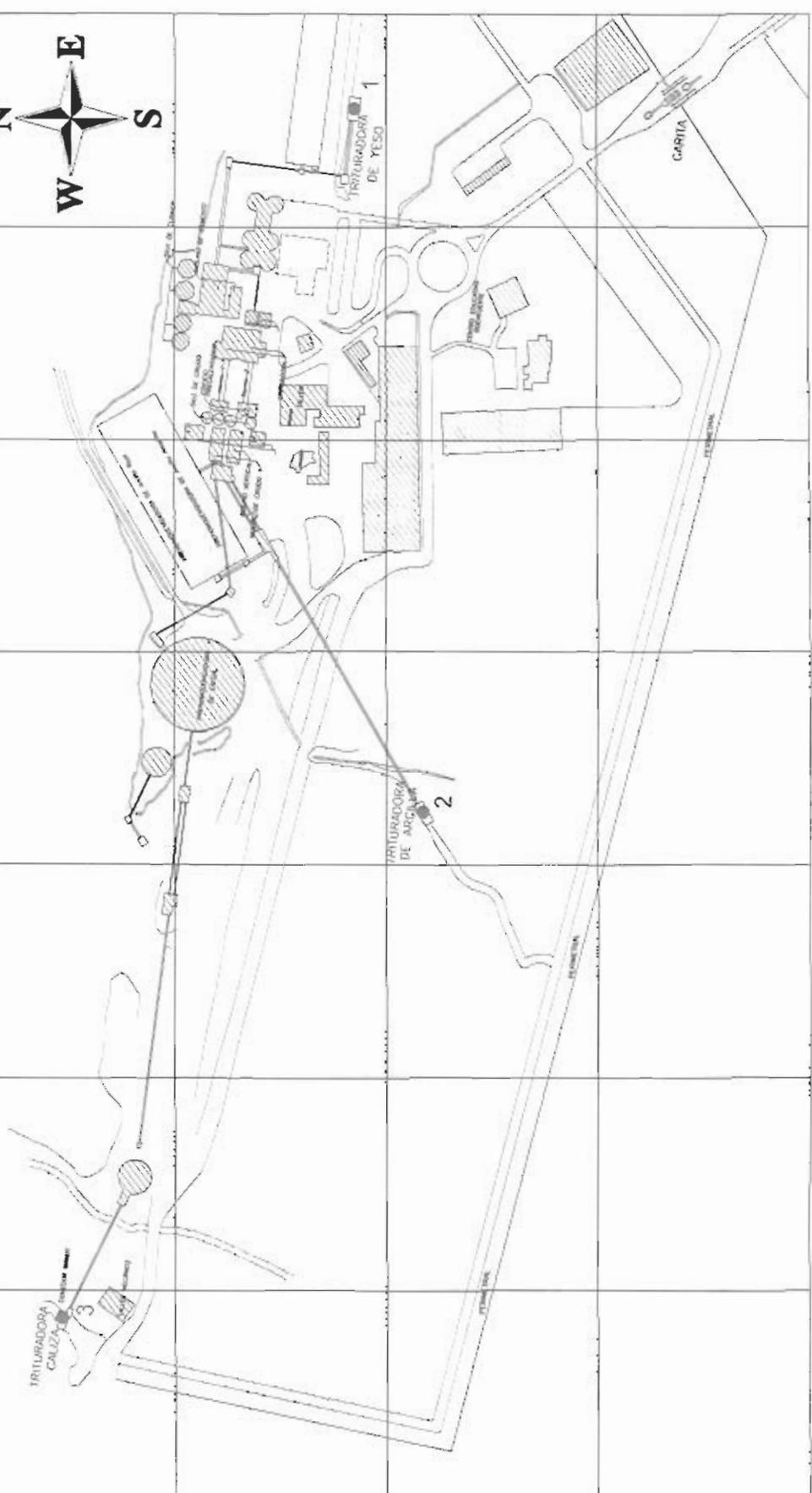
*Aerosoles farmacéuticos.*- El impactador de cascada tiene un amplio reconocimiento como una herramienta en la distribución de tamaño para la evaluación de aerosoles farmacéuticos. Sirve para determinar la distribución de tamaño de partículas de la descarga de los inhaladores medicinales de todo tipo.

*Emisión de motores.*- Una aplicación adicional de este tipo de equipos es para analizar la emisión de motores de combustión interna (diesel, gasolina), determinando la composición de las partículas que componen los gases de escape.

6035 750  
6036 0000  
6037 2500  
6038 5000  
6039 7500



9 759 000  
9 759 250  
9 759 500  
9 759 750



FECHA	NOMBRE
Dibujó 28/08/03	J. Prieto
Revisó 28/08/03	Ing. Garzón

MAPA No: 1

# FIMICP - ESPOL

**PROYECTO:**  
Determinación de la Distribución de Tamaño y Concentración de Partículas en una Industria de Procesamiento de Agregados Utilizando un Impactador de Cascada

**ESCALA:** 1:7500

**CONTIENE:** Ubicación de los Sitios de Muestreo

PUNTOS DE MEDICIÓN

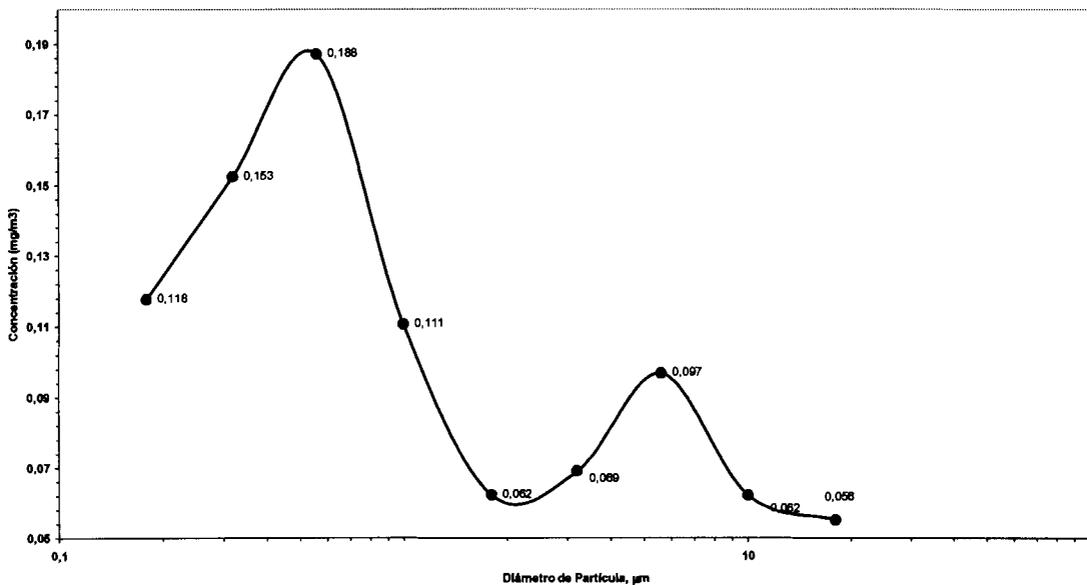
## APÉNDICE A

### CÁLCULO DE CONCENTRACIONES DE MASA

#### TRITURADORA DE YESO

#### DATOS DE MUESTREO Y CONCENTRACIÓN DE PARTICULAS 31-05-02

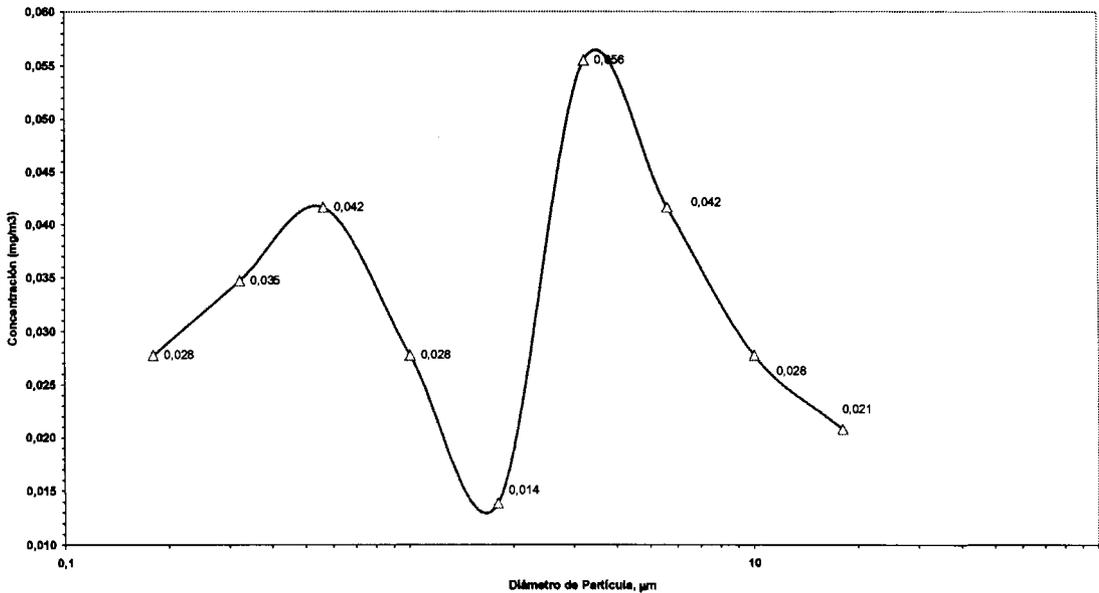
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Etapa	Rango de Tamaño Dp <sub>1</sub> (μm)	D <sub>50</sub> (μm)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia Δm (g)	Diferencia Δm (mg)	Cm (μg/m <sup>3</sup> )	Fracción de Masa (%)	Fracción de masa acumulada (%)	
0	18 - 30	18	0.0788	0.0796	0.0008	0.80	55.56	5.71	100.00	
1	10.0 - 18	10	0.0776	0.0785	0.0009	0.90	62.50	6.43	94.29	
2	6.2 - 10.0	5.6	0.0787	0.0801	0.0014	1.40	97.22	10.00	87.86	
3	3.2 - 6.2	3.2	0.0788	0.0798	0.0010	1.00	69.44	7.14	77.86	
4	1.8 - 3.2	1.8	0.0792	0.0801	0.0009	0.90	62.50	6.43	70.71	
5	1.0 - 1.8	1	0.0786	0.0802	0.0016	1.60	111.11	11.43	64.29	
6	0.56 - 1.0	0.56	0.0778	0.0805	0.0027	2.70	187.50	19.29	52.86	
7	0.32 - 0.56	0.32	0.0787	0.0809	0.0022	2.20	152.78	15.71	33.57	
8	0.18 - 0.32	0.18	0.0788	0.0805	0.0017	1.70	118.06	12.14	17.86	
Filtro	0 - 0.18	0	0.0725	0.0733	0.0008	0.80	55.56	5.71	5.71	
							<b>14.00</b>	<b>972.22</b>	<b>100.00</b>	



**CONCENTRACIÓN VS DIÁMETRO DE PARTÍCULA (31-05-02)**

## DATOS DE MUESTREO Y CONCENTRACIÓN DE PARTICULAS 07-06-02

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Etapa	Rango de Tamaño Dp <sub>1</sub> (μm)	D <sub>50</sub> (μm)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia Δm (g)	Diferencia Δm (mg)	Cm (μg/m <sup>3</sup> )	Fracción de Masa (%)	Fracción de masa acumulada (%)	
0	18 - 30	18	0.0791	0.0794	0.0003	0.30	20.83	6.67	100.00	
1	10.0 - 18	10	0.0786	0.079	0.0004	0.40	27.78	8.89	93.33	
2	6.2 - 10	5.6	0.078	0.0786	0.0006	0.60	41.67	13.33	84.44	
3	3.2 - 6.2	3.2	0.0785	0.0793	0.0008	0.80	55.56	17.78	71.11	
4	1.8 - 3.2	1.8	0.0788	0.079	0.0002	0.20	13.89	4.44	53.33	
5	1.0 - 1.8	1	0.0785	0.0789	0.0004	0.40	27.78	8.89	48.89	
6	0.56 - 1.0	0.56	0.0776	0.0782	0.0006	0.60	41.67	13.33	40.00	
7	0.32 - 0.56	0.32	0.0789	0.0794	0.0005	0.50	34.72	11.11	26.67	
8	0.18 - 0.32	0.18	0.0787	0.0791	0.0004	0.40	27.78	8.89	15.56	
Filtro	0 - 0.18	0	0.0716	0.0719	0.0003	0.30	20.83	6.67	6.67	
							<b>4.5</b>	<b>312.50</b>	<b>100.00</b>	

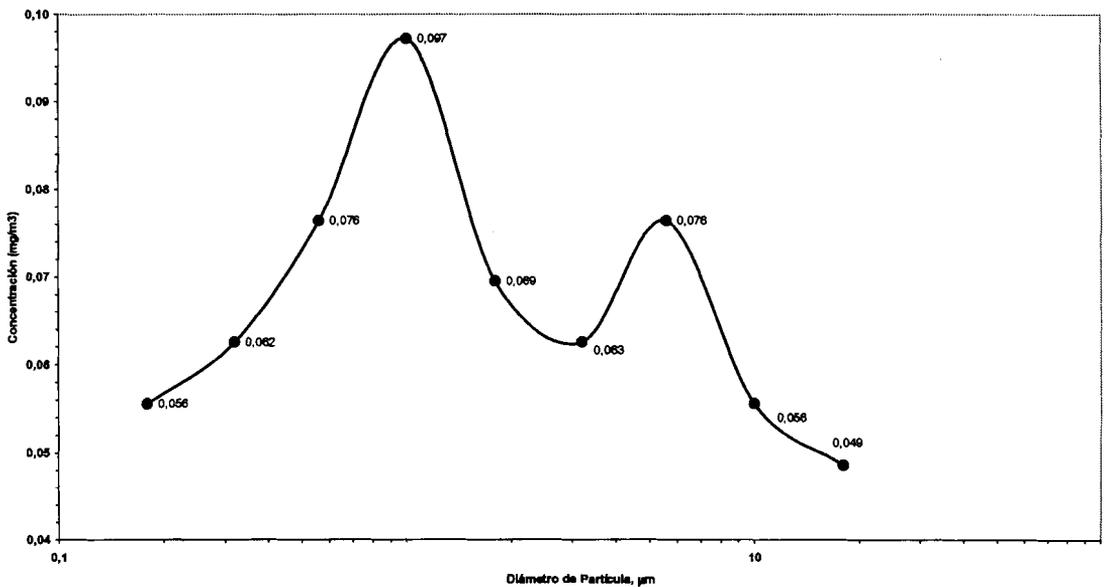


**CONCENTRACIÓN VS DIÁMETRO DE PARTÍCULA (07-06-02 )**

# TRITURADORA DE ARCILLA

## DATOS DE MUESTREO Y CONCENTRACIÓN DE PARTICULAS 14-06-02

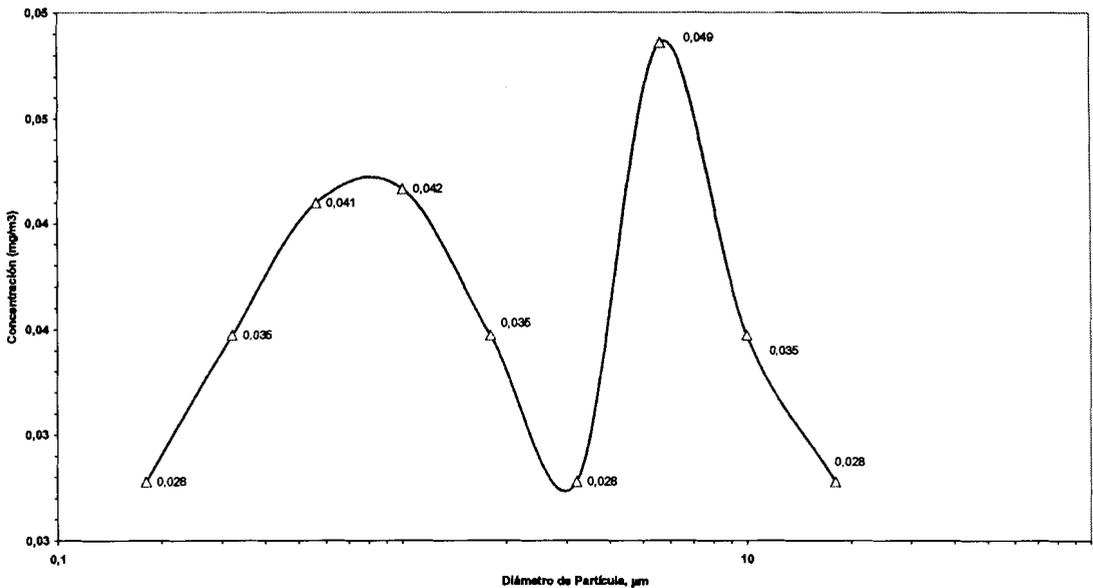
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Etapa	Rango de Tamaño $D_{p1}$ , ( $\mu\text{m}$ )	$D_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia $\Delta m$ (g)	Diferencia $\Delta m$ (mg)	$C_m$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Fracción de Masa (%)	Fracción de masa acumulada (%)	
0	18 - 30	18	0.0787	0.0794	0.0007	0.70	48.61	7.45	100.00	
1	10.0 - 18	10	0.0779	0.0787	0.0008	0.80	55.56	8.51	92.55	
2	6.2 - 10.0	5.6	0.0791	0.0802	0.0011	1.10	76.39	11.70	84.04	
3	3.2 - 6.2	3.2	0.0778	0.0787	0.0009	0.90	62.50	9.57	72.34	
4	1.8 - 3.2	1.8	0.0792	0.0802	0.0010	1.00	69.44	10.64	62.77	
5	1.0 - 1.8	1	0.078	0.0794	0.0014	1.40	97.22	14.89	52.13	
6	0.56 - 1.0	0.56	0.0778	0.0789	0.0011	1.10	76.39	11.70	37.23	
7	0.32 - 0.56	0.32	0.0788	0.0797	0.0009	0.90	62.50	9.57	25.53	
8	0.18 - 0.32	0.18	0.0778	0.0786	0.0008	0.80	55.56	8.51	15.96	
Filtro	0 - 0.18	0	0.0729	0.0736	0.0007	0.70	48.61	7.45	7.45	
							<b>9.40</b>	<b>652.78</b>	<b>100.00</b>	



**CONCENTRACIÓN VS DIÁMETRO DE PARTÍCULA (14-06-02)**

## DATOS DE MUESTREO Y CONCENTRACIÓN DE PARTICULAS 21-06-02

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Etapa	Rango de Tamaño Dp <sub>i</sub> , (μm)	D <sub>50</sub> (μm)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia Δm (g)	Diferencia Δm (mg)	Cm (μg/m <sup>3</sup> )	Fracción de Masa (%)	Fracción de masa acumulada (%)	
0	18 - 30	18	0.0791	0.0795	0.0004	0.40	27.78	8.35	100.00	
1	10.0 - 18	10	0.0786	0.0791	0.0005	0.50	34.72	10.44	91.65	
2	6.2 - 10	5.6	0.078	0.0787	0.0007	0.70	48.61	14.61	81.21	
3	3.2 - 6.2	3.2	0.0785	0.0789	0.0004	0.40	27.78	8.35	66.60	
4	1.8 - 3.2	1.8	0.0788	0.0793	0.0005	0.50	34.72	10.44	58.25	
5	1.0 - 1.8	1	0.0785	0.0791	0.0006	0.60	41.67	12.53	47.81	
6	0.56 - 1.0	0.56	0.0776	0.0782	0.0006	0.59	40.97	12.32	35.28	
7	0.32 - 0.56	0.32	0.0789	0.0794	0.0005	0.50	34.72	10.44	22.96	
8	0.18 - 0.32	0.18	0.0787	0.0791	0.0004	0.40	27.78	8.35	12.53	
Filtro	0 - 0.18	0	0.0716	0.0718	0.0002	0.20	13.89	4.18	4.18	
							<b>4.79</b>	<b>332.64</b>	<b>100.00</b>	

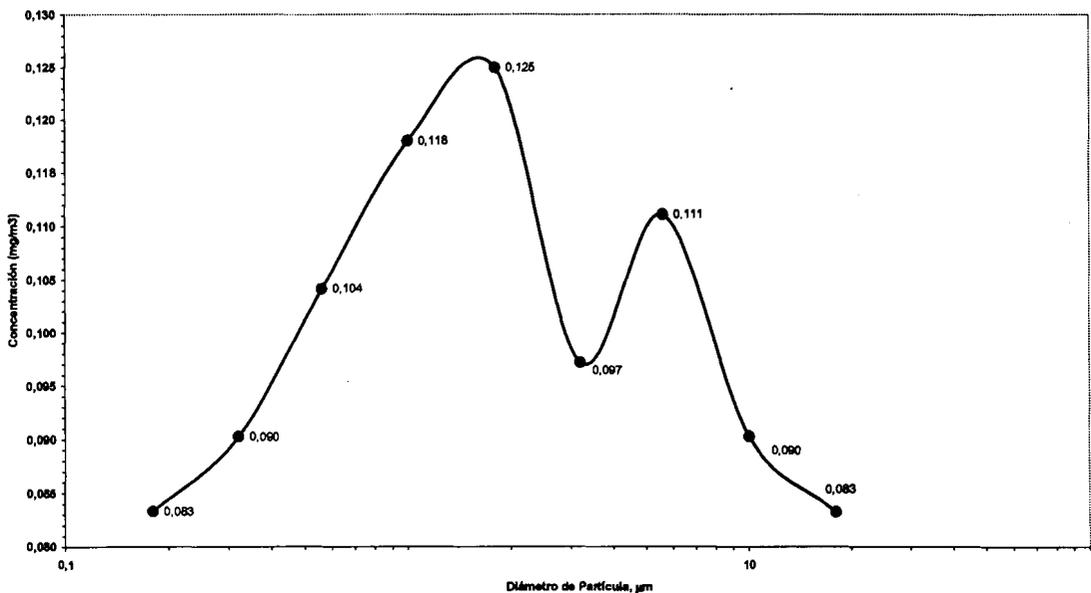


**CONCENTRACIÓN VS DIÁMETRO DE PARTÍCULA (21-06-02)**

# TRITURADORA DE CALIZA

## DATOS DE MUESTREO Y CONCENTRACIÓN DE PARTICULAS 28-06-02

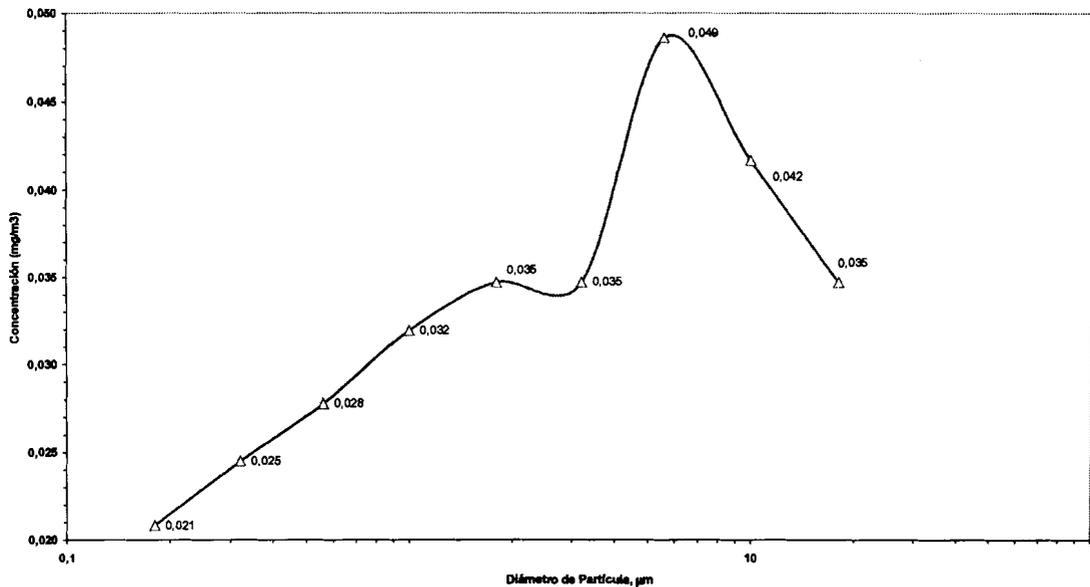
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Etapa	Rango de Tamaño Dp <sub>1</sub> , (µm)	D <sub>50</sub> (µm)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia Δm (g)	Diferencia Δm (mg)	Cm (µg/m <sup>3</sup> )	Fracción de Masa (%)	Fracción de masa acumulada (%)
0	18 - 30	18	0.0778	0.079	0.0012	1.20	83.33	8.57	100.00
1	10.0 - 18	10	0.0782	0.0795	0.0013	1.30	90.28	9.29	91.43
2	6.2 - 10.0	5.6	0.0786	0.0802	0.0016	1.60	111.11	11.43	82.14
3	3.2 - 6.2	3.2	0.0778	0.0792	0.0014	1.40	97.22	10.00	70.71
4	1.8 - 3.2	1.8	0.0787	0.0805	0.0018	1.80	125.00	12.86	60.71
5	1.0 - 1.8	1	0.0771	0.0788	0.0017	1.70	118.06	12.14	47.86
6	0.56 - 1.0	0.56	0.0781	0.0796	0.0015	1.50	104.17	10.71	35.71
7	0.32 - 0.56	0.32	0.0785	0.0798	0.0013	1.30	90.28	9.29	25.00
8	0.18 - 0.32	0.18	0.0768	0.0780	0.0012	1.20	83.33	8.57	15.71
Filtro	0 - 0.18	0	0.0717	0.0727	0.0010	1.00	69.44	7.14	7.14
						<b>14.00</b>	<b>972.22</b>	<b>100.00</b>	



**CONCENTRACIÓN VS DIÁMETRO DE PARTÍCULA (28-06-02)**

## DATOS DE MUESTREO Y CONCENTRACIÓN DE PARTICULAS 04-07-02

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Etapa	Rango de Tamaño Dp <sub>1</sub> , (μm)	D <sub>50</sub> (μm)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Diferencia Δm (g)	Diferencia Δm (mg)	Cm (μg/m <sup>3</sup> )	Fracción de Masa (%)	Fracción de masa acumulada (%)
0	18 - 30	18	0.0791	0.0796	0.0005	0.50	34.72	11.08	100.00
1	10.0 - 18	10	0.0786	0.0792	0.0006	0.60	41.67	13.29	88.92
2	6.2 - 10	5.6	0.078	0.0787	0.0007	0.70	48.61	15.51	75.63
3	3.2 - 6.2	3.2	0.0785	0.079	0.0005	0.50	34.72	11.08	60.12
4	1.8 - 3.2	1.8	0.0788	0.0793	0.0005	0.50	34.72	11.08	49.04
5	1.0 - 1.8	1	0.0785	0.07896	0.0005	0.46	31.94	10.19	37.96
6	0.56 - 1.0	0.56	0.0776	0.0780	0.0004	0.40	27.78	8.86	27.76
7	0.32 - 0.56	0.32	0.0789	0.07925	0.0004	0.35	24.51	7.82	18.90
8	0.18 - 0.32	0.18	0.0787	0.0790	0.0003	0.30	20.83	6.65	11.08
Filtro	0 - 0.18	0	0.0716	0.0718	0.0002	0.20	13.89	4.43	4.43
						<b>4.51</b>	<b>313.40</b>	<b>100.00</b>	



**CONCENTRACIÓN VS DIÁMETRO DE PARTÍCULA (04-07-02)**

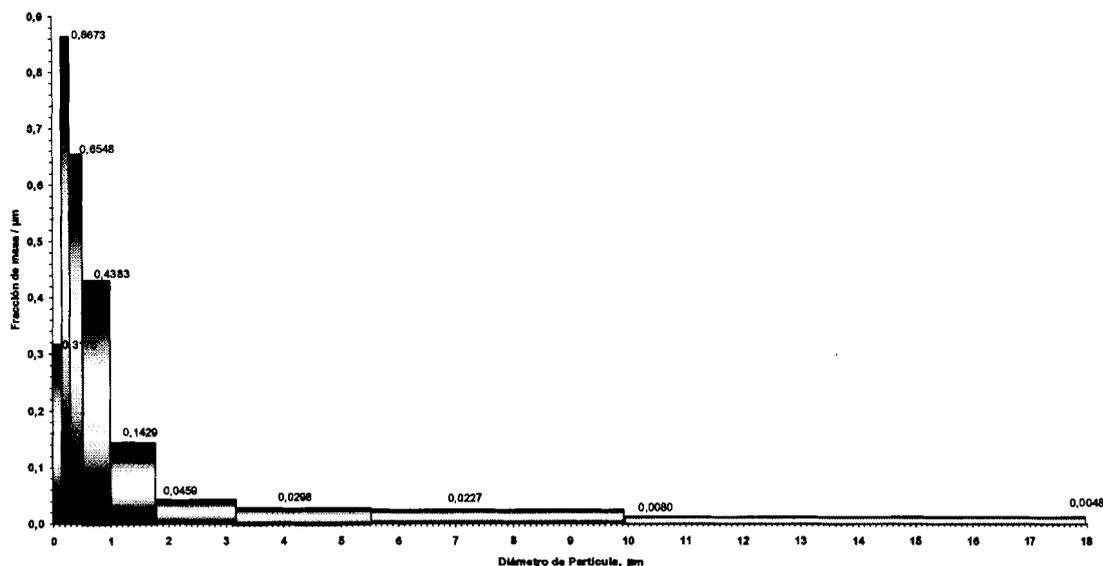
## APÉNDICE B

### HISTOGRAMAS DE LA DISTRIBUCIÓN DE MASA DE PARTÍCULAS EN FUNCIÓN DE SU DIÁMETRO AERODINÁMICO.

#### TRITURADORA DE YESO

#### DATOS PARA ELABORACIÓN DE HISTOGRAMA DE PARTICULAS (31-05-02)

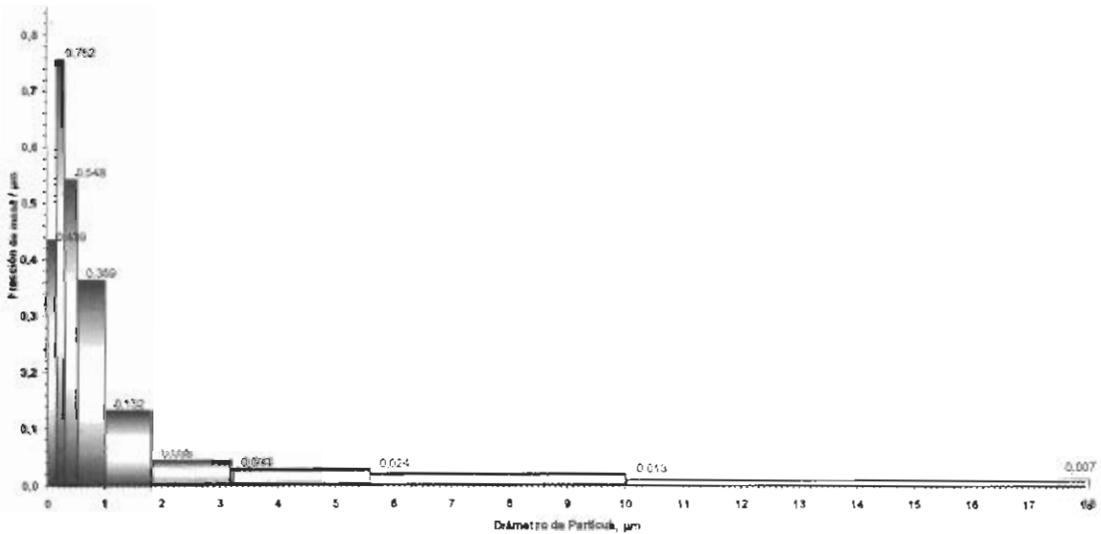
1	2	3	4	5
Etapa	Rango de Tamaño (μm)	Intervalo (μm)	Fracción de Masa	Fracción de Masa/ intervalo (1/μm)
0	18 - 30	12	0,0571	0,005
1	10.0 - 18	8	0,0643	0,008
2	5.6 - 10.0	4,4	0,1000	0,023
3	3.2 - 5.6	2,4	0,0714	0,030
4	1.8 - 3.2	1,4	0,0643	0,046
5	1.0 - 1.8	0,8	0,1143	0,143
6	0.56 - 1.0	0,44	0,1929	0,438
7	0.32 - 0.56	0,24	0,1571	0,655
8	0.18 - 0.32	0,14	0,1214	0,867
Filtro	0 - 0.18	0,18	0,0571	0,317



**HISTOGRAMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE MASA DE PARTÍCULAS TRITURADORA DE YESO (31-05-02)**

**DATOS PARA ELABORACIÓN DE HISTOGRAMA  
DE PARTICULAS (07-06-02)**

1	2	3	4	5
Etapa	Rango de Tamaño (μm)	Intervalo (μm)	Fracción de Masa	Fracción de Masa/ intervalo (1/μm)
0	18 - 30	12	7,8947	0,658
1	10.0 - 18	8	10,5263	1,316
2	5.6 - 10.0	4,4	10,5263	2,392
3	3.2 - 5.6	2,4	7,8947	3,289
4	1.8 - 3.2	1,4	5,2632	3,759
5	1.0 - 1.8	0,8	10,5263	13,158
6	0.56 - 1.0	0,44	15,7895	35,885
7	0.32 - 0.56	0,24	13,1579	54,825
8	0.18 - 0.32	0,14	10,5263	75,188
Filtro	0 - 0.18	0,18	7,8947	43,860

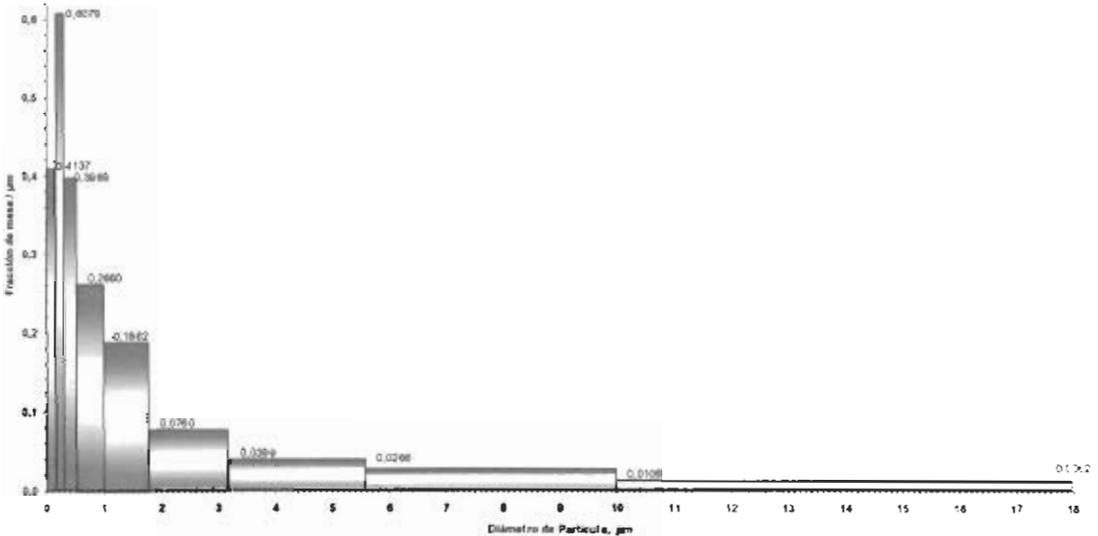


**HISTOGRAMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE MASA  
DE PARTICULAS TRITURADORA DE YESO (07-06-02 )**

**TRITURADORA DE ARCILLA**

**DATOS PARA ELABORACIÓN DE HISTOGRAMA  
DE PARTICULAS (14-06-02)**

1	2	3	4	5
Etapa	Rango de Tamaño (µm)	Intervalo (µm)	Fracción de Masa	Fracción de Masa/ intervalo (1/µm)
0	18 - 30	12	0,0745	0,006
1	10.0 - 18	8	0,0851	0,011
2	5.6 - 10.0	4,4	0,1170	0,027
3	3.2 - 5.6	2,4	0,0957	0,040
4	1.8 - 3.2	1,4	0,1064	0,076
5	1.0 - 1.8	0,8	0,1489	0,186
6	0.56 - 1.0	0,44	0,1170	0,266
7	0.32 - 0.56	0,24	0,0957	0,399
8	0.18 - 0.32	0,14	0,0851	0,608
Filtro	0 - 0.18	0,18	0,0745	0,414

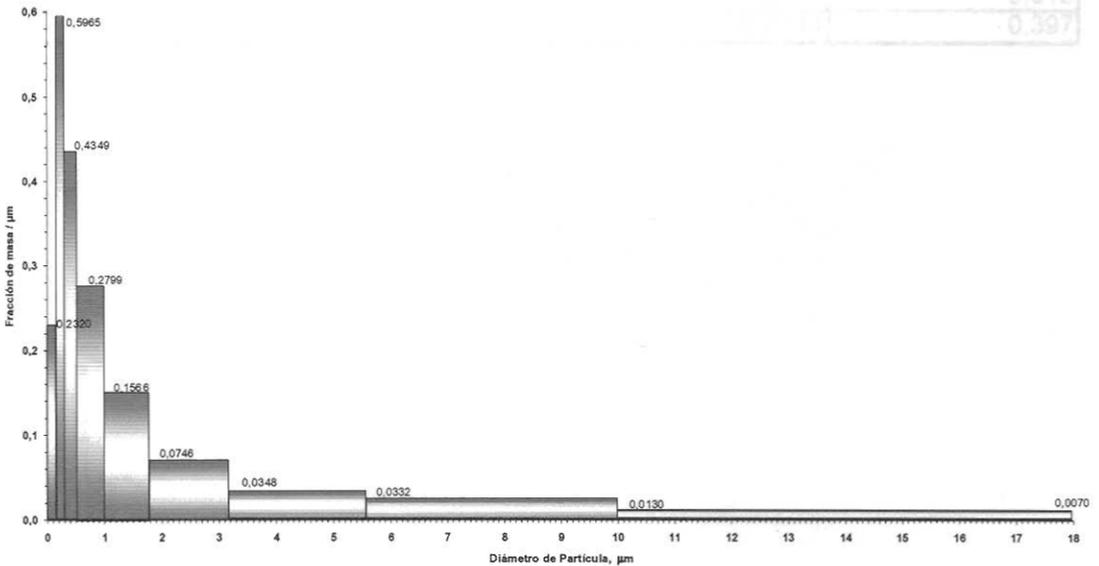


**HISTOGRAMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE MASA  
DE PARTÍCULAS TRITURADORA DE ARCILLA (14-06-02)**

## DATOS PARA ELABORACIÓN DE HISTOGRAMA

### DE PARTICULAS (21-06-02)

1	2	3	4	5
Etapa	Rango de Tamaño (µm)	Intervalo (µm)	Fracción de Masa	Fracción de Masa/ intervalo (1/µm)
0	18 - 30	12	0,0835	0,007
1	10.0 - 18	8	0,1044	0,013
2	5.6 - 10.0	4,4	0,1461	0,033
3	3.2 - 5.6	2,4	0,0835	0,035
4	1.8 - 3.2	1,4	0,1044	0,075
5	1.0 - 1.8	0,8	0,1253	0,157
6	0.56 - 1.0	0,44	0,1232	0,280
7	0.32 - 0.56	0,24	0,1044	0,435
8	0.18 - 0.32	0,14	0,0835	0,596
Filtro	0 - 0.18	0,18	0,0418	0,232

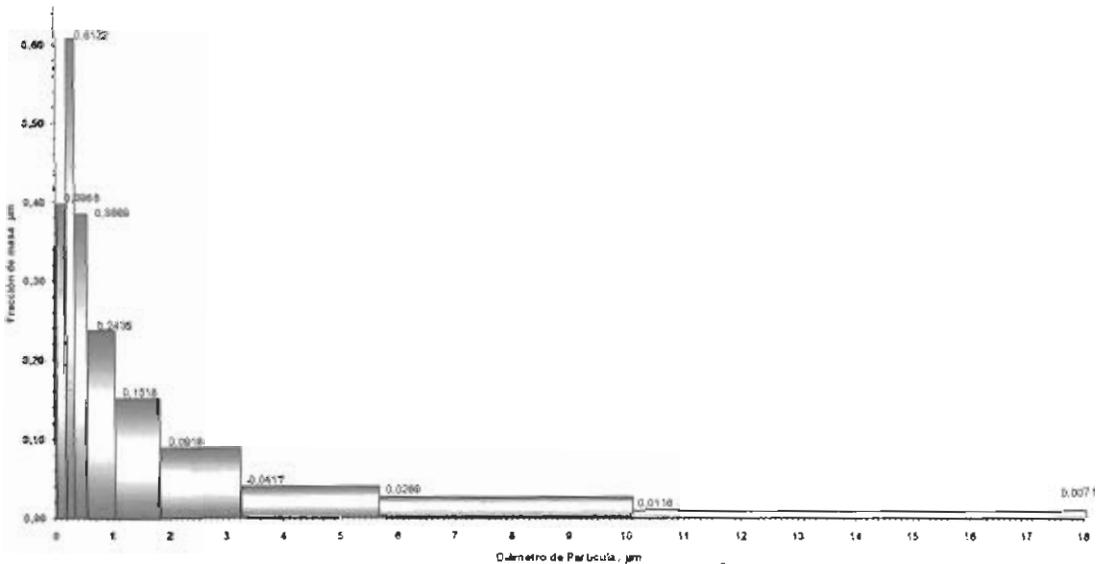


## HISTOGRAMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE MASA DE PARTÍCULAS TRITURADORA DE ARCILLA (21-06-02 )

# TRITURADORA DE CALIZA

## DATOS PARA ELABORACIÓN DE HISTOGRAMA DE PARTICULAS (28-06-02)

1	2	3	4	5
Etapa	Rango de Tamaño (µm)	Intervalo (µm)	Fracción de Masa	Fracción de Masa/ intervalo (1/µm)
0	18 - 30	12	0,0857	0,007
1	10.0 - 18	8	0,0929	0,012
2	5.6 - 10.0	4,4	0,1143	0,026
3	3.2 - 5.6	2,4	0,1000	0,042
4	1.8 - 3.2	1,4	0,1286	0,092
5	1.0 - 1.8	0,8	0,1214	0,152
6	0.56 - 1.0	0,44	0,1071	0,244
7	0.32 - 0.56	0,24	0,0929	0,387
8	0.18 - 0.32	0,14	0,0857	0,612
Filtro	0 - 0.18	0,18	0,0714	0,397



**HISTOGRAMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE MASA**

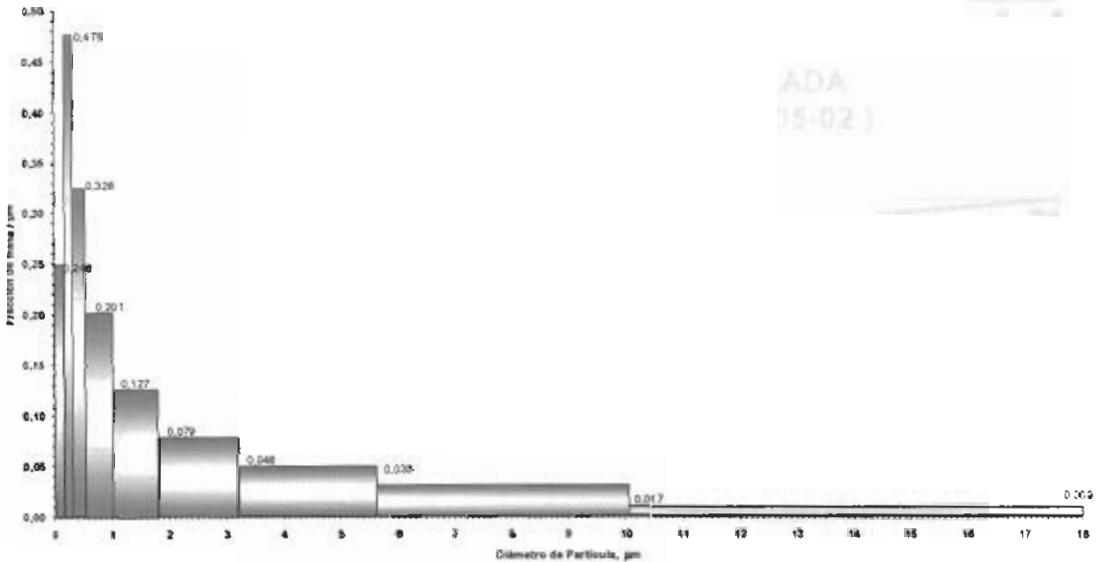
**DE PARTÍCULAS TRITURADORA DE CALIZA (28-06-02 )**

## DATOS PARA ELABORACIÓN DE HISTOGRAMA

### DE PARTICULAS (04-07-02)

ANAMETRO AERODII

1	2	3	4	5
Etapa	Rango de Tamaño (µm)	Intervalo (µm)	Fracción de Masa	Fracción de Masa/intervalo (1/µm)
0	18 - 30	12	0,1108	0,009
1	10.0 - 18	8	0,1329	0,017
2	5.6 - 10.0	4,4	0,1551	0,035
3	3.2 - 5.6	2,4	0,1108	0,046
4	1.8 - 3.2	1,4	0,1108	0,079
5	1.0 - 1.8	0,8	0,1019	0,127
6	0.56 - 1.0	0,44	0,0886	0,201
7	0.32 - 0.56	0,24	0,0782	0,326
8	0.18 - 0.32	0,14	0,0665	0,475
Filtro	0 - 0.18	0,18	0,0443	0,246



## HISTOGRAMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE MASA

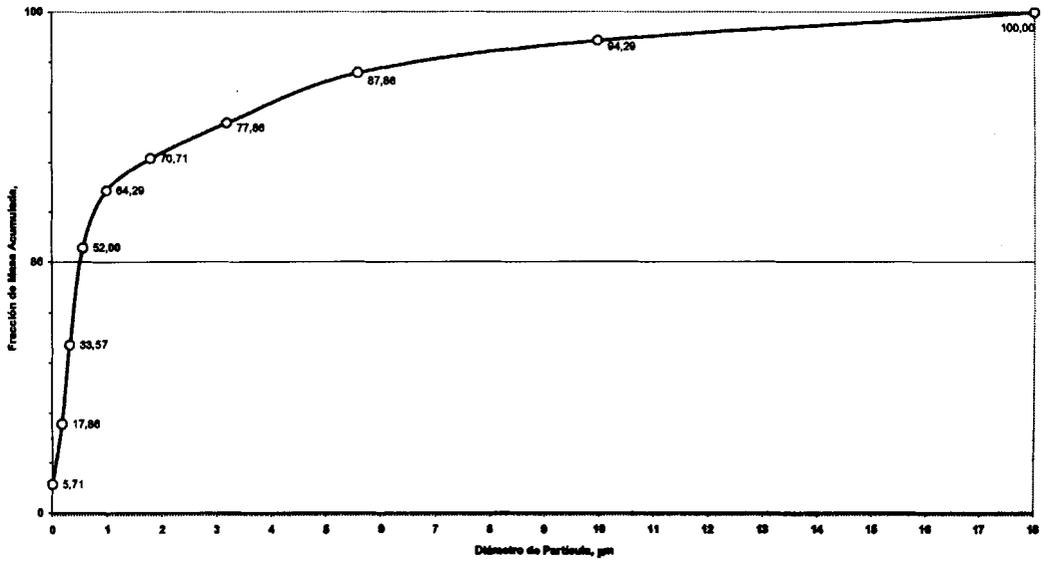
### DE PARTÍCULAS TRITURADORA DE CALIZA (04-07-02 )

CUMULADA  
RO (07-06-02 )

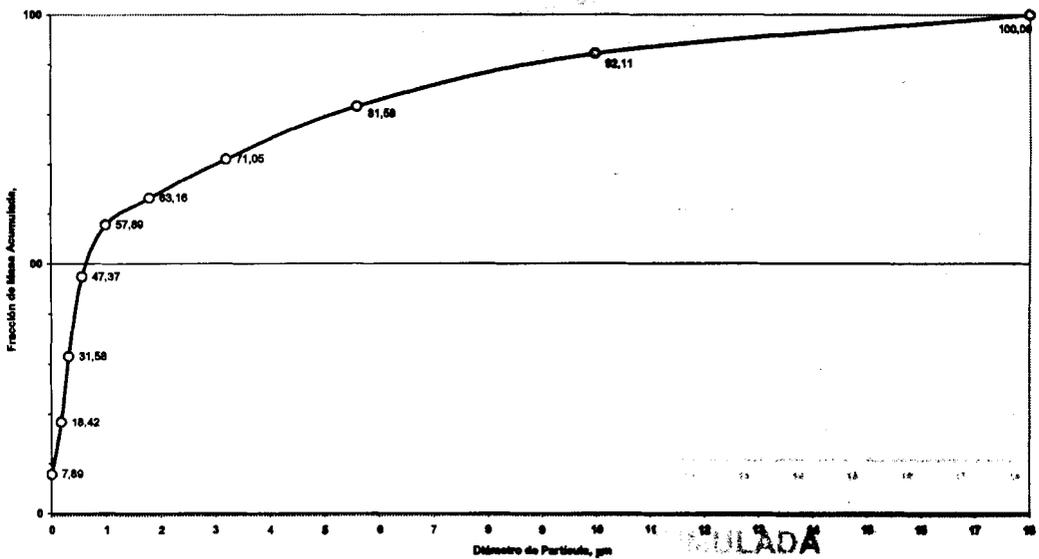
## APÉNDICE C

### DISTRIBUCIÓN DE MASA ACUMULADA EN FUNCIÓN DE SU DIÁMETRO AERODINÁMICO

TRITURADORA DE YESO.

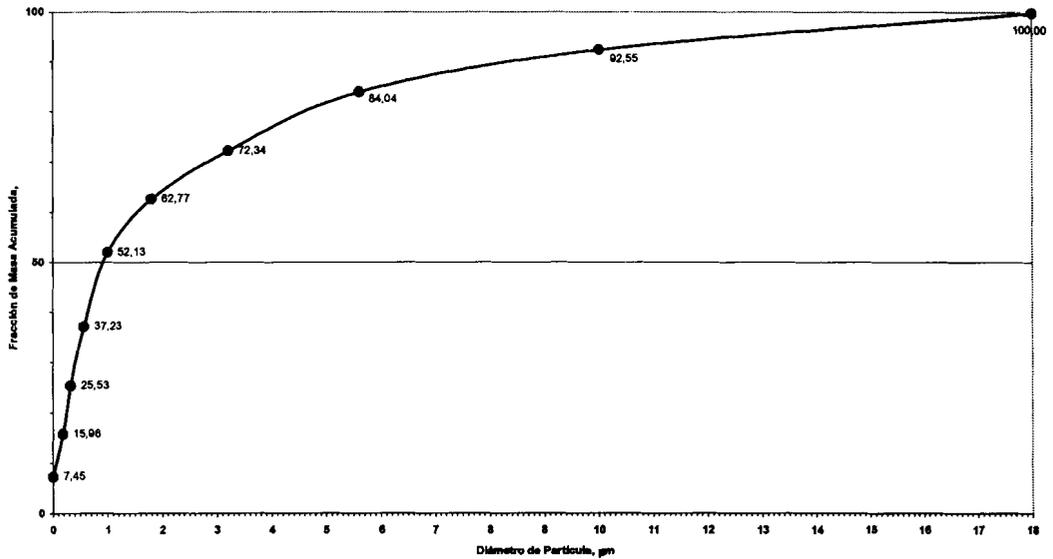


### DISTRIBUCIÓN DE MASA ACUMULADA EN FUNCIÓN DE SU DIÁMETRO (31-05-02)

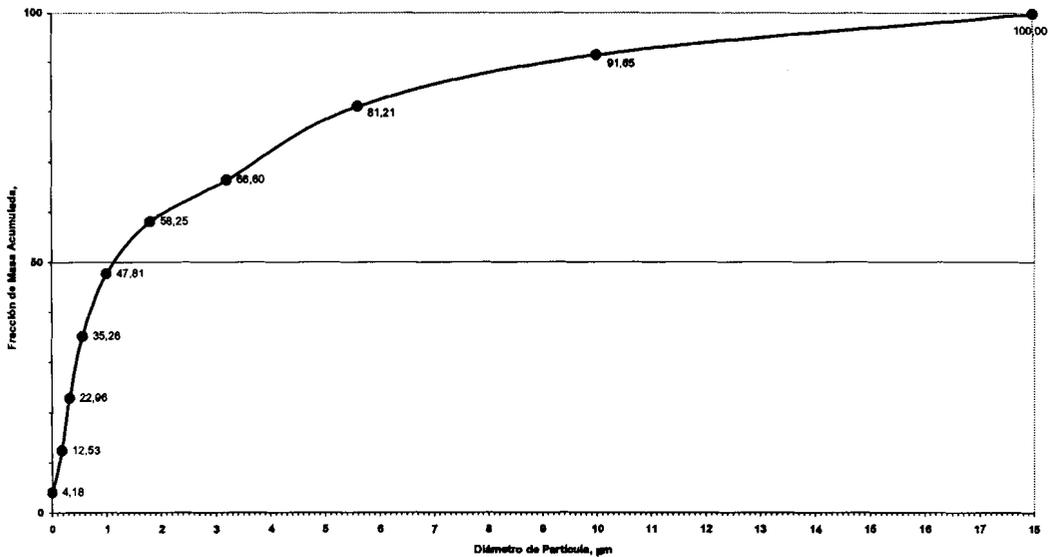


### DISTRIBUCIÓN DE MASA ACUMULADA EN FUNCIÓN DE SU DIÁMETRO (07-06-02)

# TRITURADORA DE ARCILLA

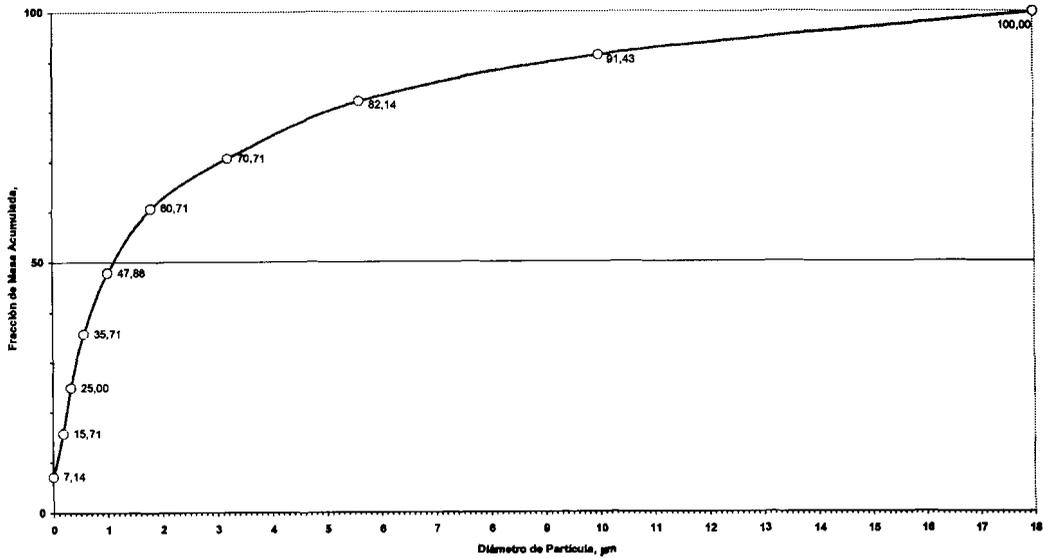


**DISTRIBUCIÓN DE MASA ACUMULADA  
EN FUNCION DE SU DIAMETRO (14-06-02 )**

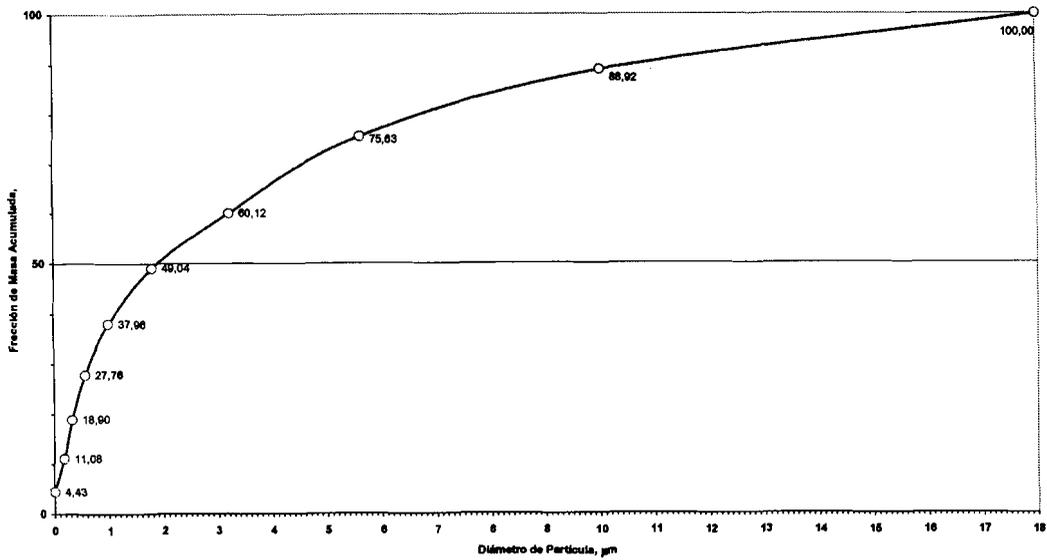


**DISTRIBUCIÓN DE MASA ACUMULADA  
EN FUNCION DE SU DIAMETRO (21-06-02 )**

# TRITURADORA DE CALIZA



**DISTRIBUCIÓN DE MASA ACUMULADA  
EN FUNCION DE SU DIAMETRO (28-06-02 )**



**DISTRIBUCIÓN DE MASA ACUMULADA  
EN FUNCION DE SU DIAMETRO (04-07-02 )**

## APÉNDICE D

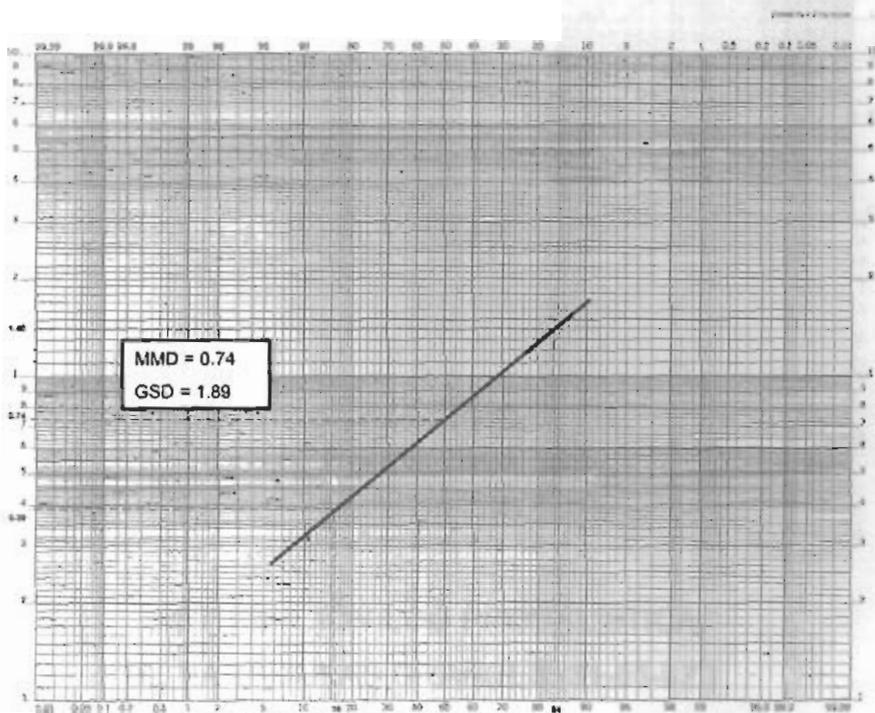
### CÁLCULO DE LA MEDIA GEOMÉTRICA Y DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR GEOMÉTRICA

TRITURADORA DE YESO

	4	5
Final (mg)	Diferencia (mg)	Fracción de masa (%)

#### DATOS DE DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL PARTICULAS PEQUEÑAS 31-05-02

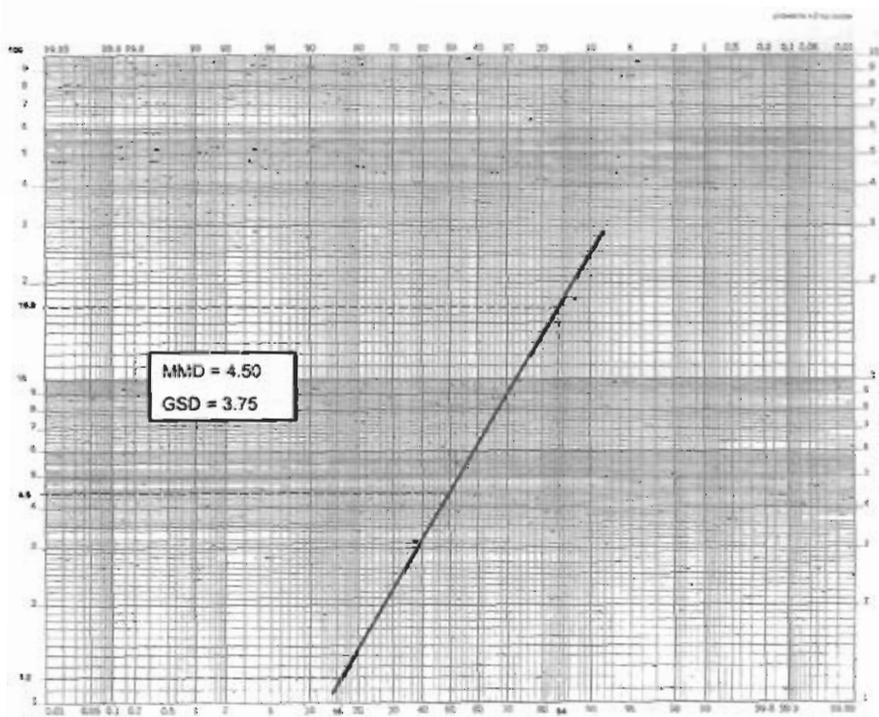
1	2	3	4	5	6	7	8
Etapa	Masa Inicial (mg)	Masa Final (mg)	Diferencia (mg)	Fracción de Masa (%)	ECD (µm)	Rango de Tamaño (µm)	Fracción de masa acumulada (%)
6	0,0778	0,0805	0,0027	36,49	0,56	0,56 - 1	100,00
7	0,0787	0,0809	0,0022	29,73	0,32	0,32 - 0,56	63,51
8	0,0788	0,0805	0,0017	22,97	0,18	0,18 - 0,32	33,78
Filtro	0,0725	0,0733	0,0008	10,81	0	0 - 0,18	10,81
			0,0074	100,00			



**DISTRIBUCIÓN LOG PROBALISTICA DE PARTICULAS PEQUEÑAS (31-05-02 )**

**DATOS DE DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL  
PARTICULAS GRANDES 31-05-02**

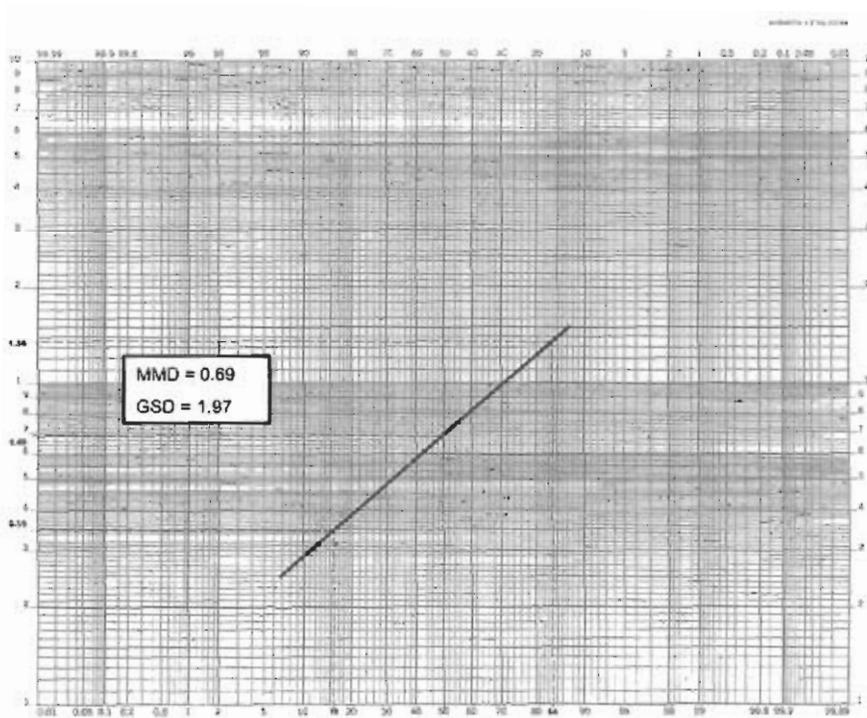
1	2	3	4	5	6	7	8
Etapa	Masa Inicial (mg)	Masa Final (mg)	Diferencia (mg)	Fracción de Masa (%)	ECD ( $\mu\text{m}$ )	Rango de Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	Fracción de masa acumulada (%)
0	0,0788	0,0796	0,0008	12,12	18,0	> 18,0	100,00
1	0,0776	0,0785	0,0009	13,64	10	10,0 - 18	87,88
2	0,0787	0,0801	0,0014	21,21	5,6	5,6 - 10,0	74,24
3	0,0788	0,0798	0,0010	15,15	3,2	3,2 - 5,6	53,03
4	0,0792	0,0801	0,0009	13,64	1,8	1,8 - 3,2	37,88
5	0,0786	0,0802	0,0016	24,24	1	1 - 1,8	24,24
			0,0066	100,00			



**DISTRIBUCIÓN LOG PROBALISTICA  
DE PARTICULAS GRANDES (31-05-02 )**

**DATOS DE DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL  
PARTICULAS PEQUEÑAS 07-06-02**

1	2	3	4	5	6	7	8
Etapa	Masa Inicial (mg)	Masa Final (mg)	Diferencia (mg)	Fracción de Masa (%)	ECD ( $\mu\text{m}$ )	Rango de Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	Fracción de masa acumulada (%)
6	0,0776	0,0782	0,0006	33,33	0,56	0,56 - 1	100,00
7	0,0789	0,0794	0,0005	27,78	0,32	0,32 - 0,56	66,67
8	0,0787	0,0791	0,0004	22,22	0,18	0,18 - 0,32	38,89
Filtro	0,0716	0,0719	0,0003	16,67	0	0 - 0,18	16,67
			0,0018	100,00			

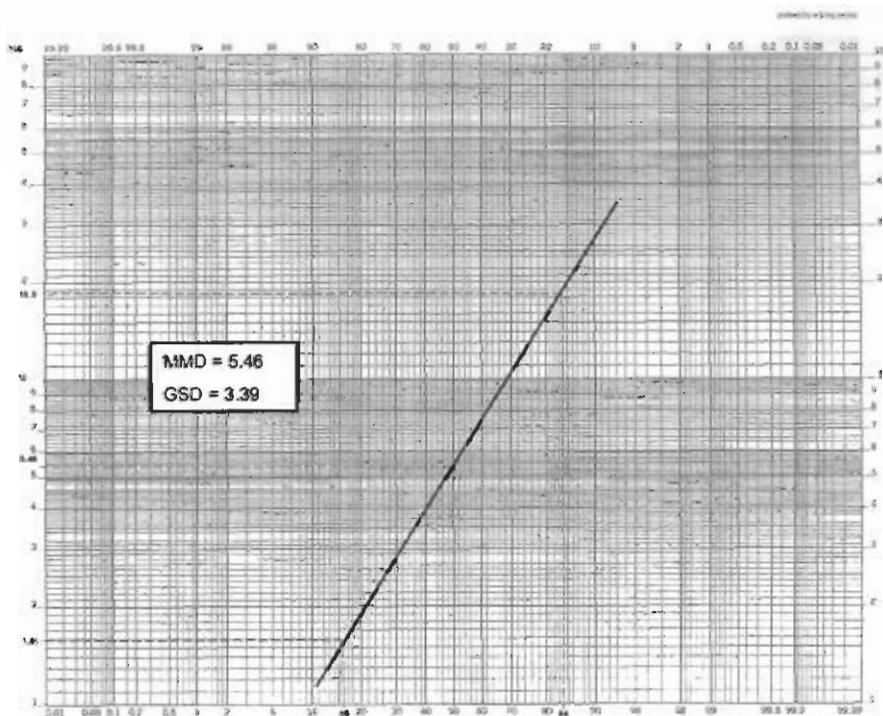


**DISTRIBUCIÓN LOG PROBALISTICA  
DE PARTICULAS PEQUEÑAS (07-06-02 )**

## DATOS DE DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL

### PARTICULAS GRANDES 07-06-02

1	2	3	4	5	6	7	8
Etapa	Masa Inicial (mg)	Masa Final (mg)	Diferencia (mg)	Fracción de Masa (%)	ECD (µm)	Rango de Tamaño (µm)	Fracción de masa acumulada (%)
0	0,0791	0,0794	0,0003	15,00	18,0	> 18,0	100,00
1	0,0786	0,0790	0,0004	20,00	10	10,0 - 18	85,00
2	0,0780	0,0784	0,0004	20,00	5,6	5,6 - 10,0	65,00
3	0,0785	0,0788	0,0003	15,00	3,2	3,2 - 5,6	45,00
4	0,0788	0,0790	0,0002	10,00	1,8	1,8 - 3,2	30,00
5	0,0785	0,0789	0,0004	20,00	1	1 - 1,8	20,00
			0,0020	100,00			



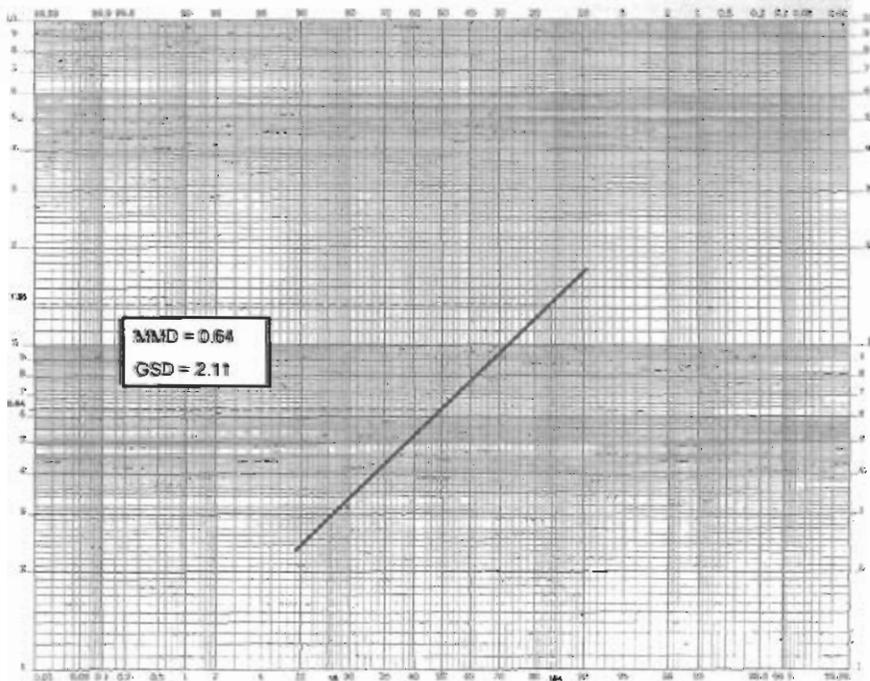
**DISTRIBUCIÓN LOG PROBALISTICA  
DE PARTICULAS GRANDES (07-06-02 )**

# TRITURADORA DE ARCILLA

## DATOS DE DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL

### PARTICULAS PEQUEÑAS 14-06-02

1	2	3	4	5	6	7	8
Etapa	Masa Inicial (mg)	Masa Final (mg)	Diferencia (mg)	Fracción de Masa (%)	ECD ( $\mu\text{m}$ )	Rango de Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	Fracción de masa acumulada (%)
6	0,0778	0,0789	0,0011	31,43	0,56	0.56 - 1	100,00
7	0,0788	0,0797	0,0009	25,71	0,32	0.32 - 0.56	68,57
8	0,0778	0,0786	0,0008	22,86	0,18	0.18 - 0.32	42,86
Filtro	0,0729	0,0736	0,0007	20,00	0	0 - 0.18	20,00
			0,0035	100,00			

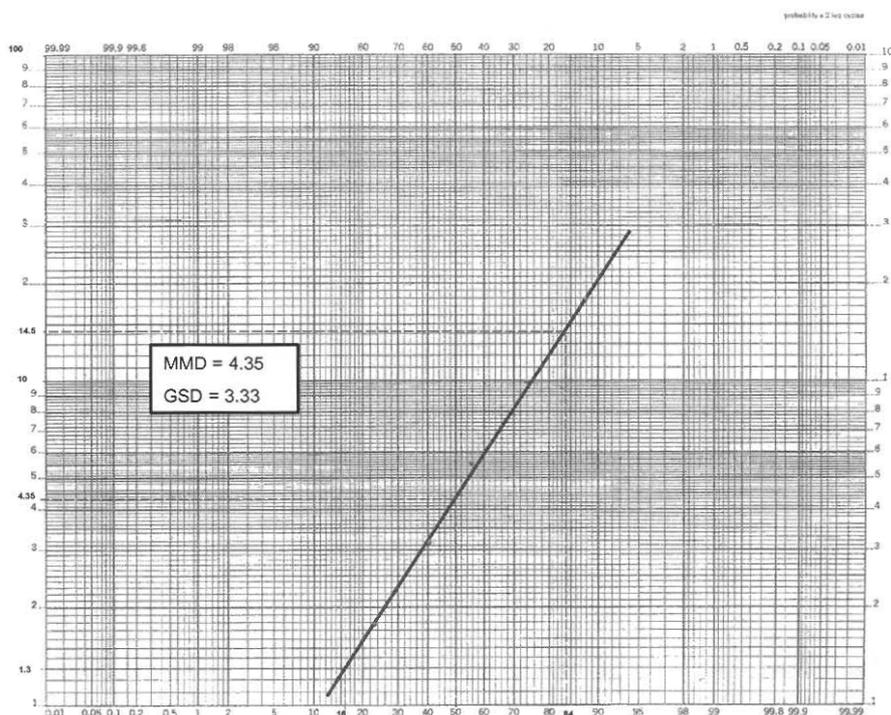


DISTRIBUCIÓN LOG PROBALISTICA  
DE PARTICULAS PEQUEÑAS (14-06-02)

## DATOS DE DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL

### PARTICULAS GRANDES 14-06-02

1	2	3	4	5	6	7	8
Etapa	Masa Inicial (mg)	Masa Final (mg)	Diferencia (mg)	Fracción de Masa (%)	ECD (µm)	Rango de Tamaño (µm)	Fracción de masa acumulada (%)
0	0,0787	0,0794	0,0007	11,86	18,0	> 18.0	100,00
1	0,0779	0,0787	0,0008	13,56	10	10.0 - 18	88,14
2	0,0791	0,0802	0,0011	18,64	5,6	5.6 - 10.0	74,58
3	0,0778	0,0787	0,0009	15,25	3,2	3.2 - 5.6	55,93
4	0,0792	0,0802	0,0010	16,95	1,8	1.8 - 3.2	40,68
5	0,078	0,0794	0,0014	23,73	1	1 - 1.8	23,73
			0,0059	100,00			

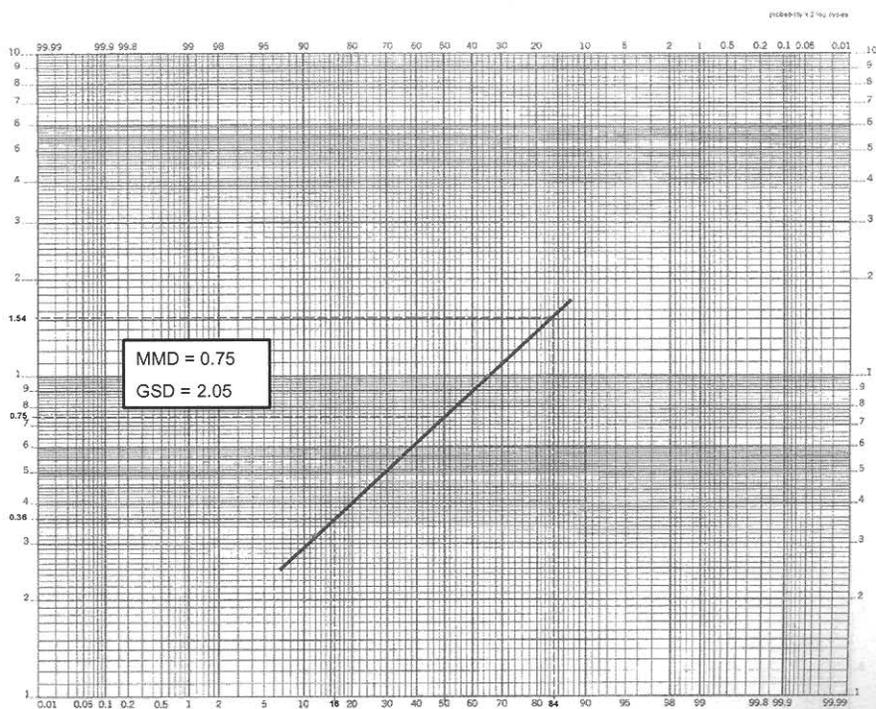


**DISTRIBUCIÓN LOG PROBALISTICA  
DE PARTICULAS GRANDES (14-06-02)**

## DATOS DE DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL

### PARTICULAS PEQUEÑAS 21-06-02

1	2	3	4	5	6	7	8
Etapa	Masa Inicial (mg)	Masa Final (mg)	Diferencia (mg)	Fracción de Masa (%)	ECD (µm)	Rango de Tamaño (µm)	Fracción de masa acumulada (%)
6	0,0776	0,0782	0,0006	34,91	0,56	0.56 - 1	100,00
7	0,0789	0,0794	0,0005	29,59	0,32	0.32 - 0.56	65,09
8	0,0787	0,0791	0,0004	23,67	0,18	0.18 - 0.32	35,50
Filtro	0,0716	0,0718	0,0002	11,83	0	0 - 0.18	11,83
			0,0017	100,00			

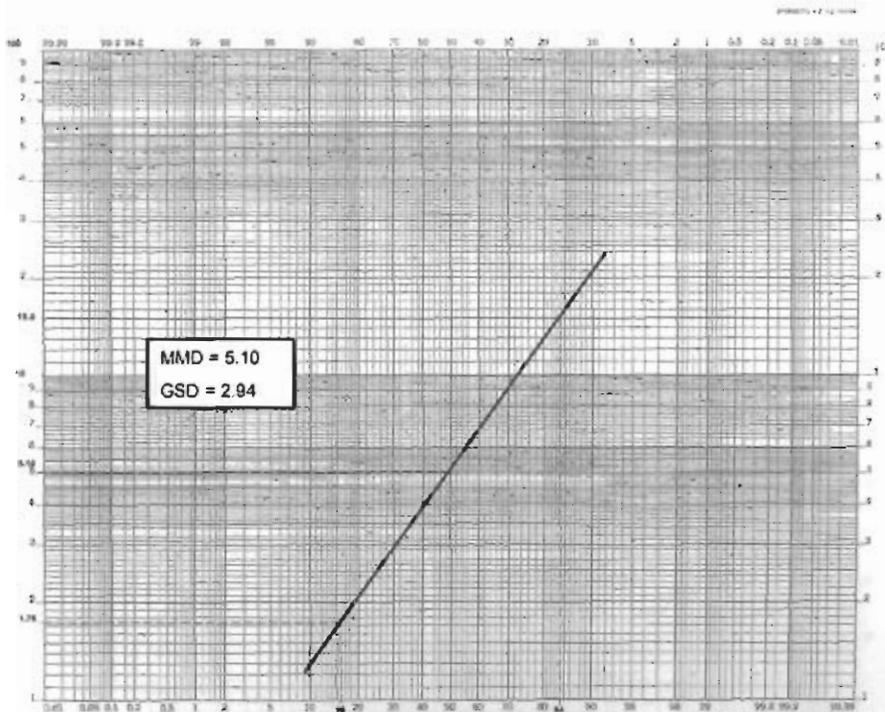


## DISTRIBUCIÓN LOG PROBABILISTICA DE PARTICULAS PEQUEÑAS (21-06-02)

## DATOS DE DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL

### PARTICULAS GRANDES 21-06-02

1	2	3	4	5	6	7	8
Etapa	Masa Inicial (mg)	Masa Final (mg)	Diferencia (mg)	Fracción de Masa (%)	ECD (µm)	Rango de Tamaño (µm)	Fracción de masa acumulada (%)
0	0,0791	0,0795	0,0004	12,90	18,0	> 18,0	100,00
1	0,0786	0,0791	0,0005	16,13	10	10,0 - 18	87,10
2	0,078	0,0787	0,0007	22,58	5,6	5,6 - 10,0	70,97
3	0,0785	0,0789	0,0004	12,90	3,2	3,2 - 5,6	48,39
4	0,0788	0,0793	0,0005	16,13	1,8	1,8 - 3,2	35,48
5	0,0785	0,0791	0,0006	19,35	1	1 - 1,8	19,35
			0,0031	100,00			



**DISTRIBUCIÓN LOG PROBALISTICA  
DE PARTICULAS GRANDES (21-06-02 )**

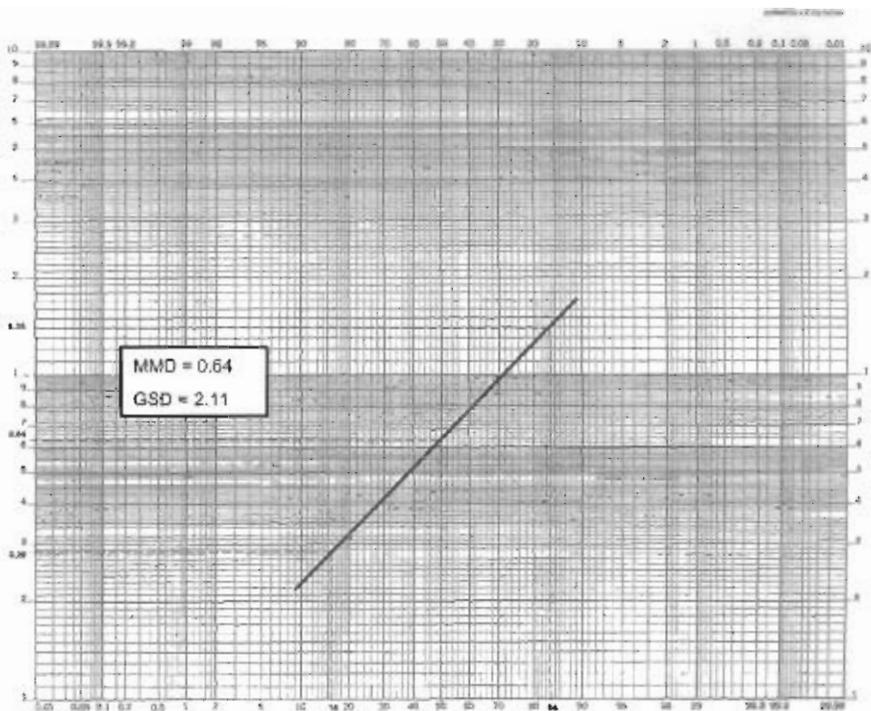
DE PARTICULAS PEQUEÑAS (20-06-02 )

**TRITURADORA DE CALIZA**

**DATOS DE DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL**

**PARTICULAS PEQUEÑAS 28-06-02**

1	2	3	4	5	6	7	8
Etapa	Masa Inicial (mg)	Masa Final (mg)	Diferencia (mg)	Fracción de Masa (%)	ECD (µm)	Rango de Tamaño (µm)	Fracción de masa acumulada (%)
6	0,0781	0,0796	0,0015	30,00	0,56	0,56 - 1	100,00
7	0,0785	0,0798	0,0013	26,00	0,32	0,32 - 0,56	70,00
8	0,0768	0,0780	0,0012	24,00	0,18	0,18 - 0,32	44,00
Filtro	0,0717	0,0727	0,0010	20,00	0	0 - 0,18	20,00
			0,0050	100,00			



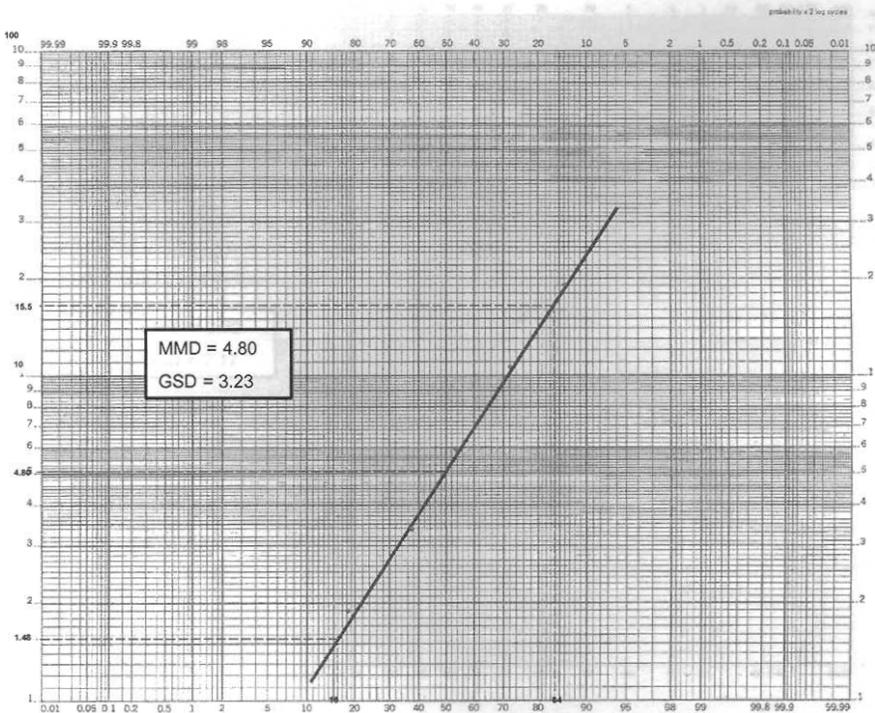
**DISTRIBUCIÓN LOG PROBALISTICA  
DE PARTICULAS PEQUEÑAS (28-06-02)**

## DATOS DE DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL

### PARTICULAS GRANDES 28-06-02

1	2	3	4	5	6	7	8
Etapa	Masa Inicial (mg)	Masa Final (mg)	Diferencia (mg)	Fracción de Masa (%)	ECD (µm)	Rango de Tamaño (µm)	Fracción de masa acumulada (%)
0	0,0778	0,0790	0,0012	13,33	18,0	> 18.0	100,00
1	0,0782	0,0795	0,0013	14,44	10	10.0 - 18	86,67
2	0,0786	0,0802	0,0016	17,78	5,6	5.6 - 10.0	72,22
3	0,0778	0,0792	0,0014	15,56	3,2	3.2 - 5.6	54,44
4	0,0787	0,0805	0,0018	20,00	1,8	1.8 - 3.2	38,89
5	0,0771	0,0788	0,0017	18,89	1	1 - 1.8	18,89

0,0090      100,00

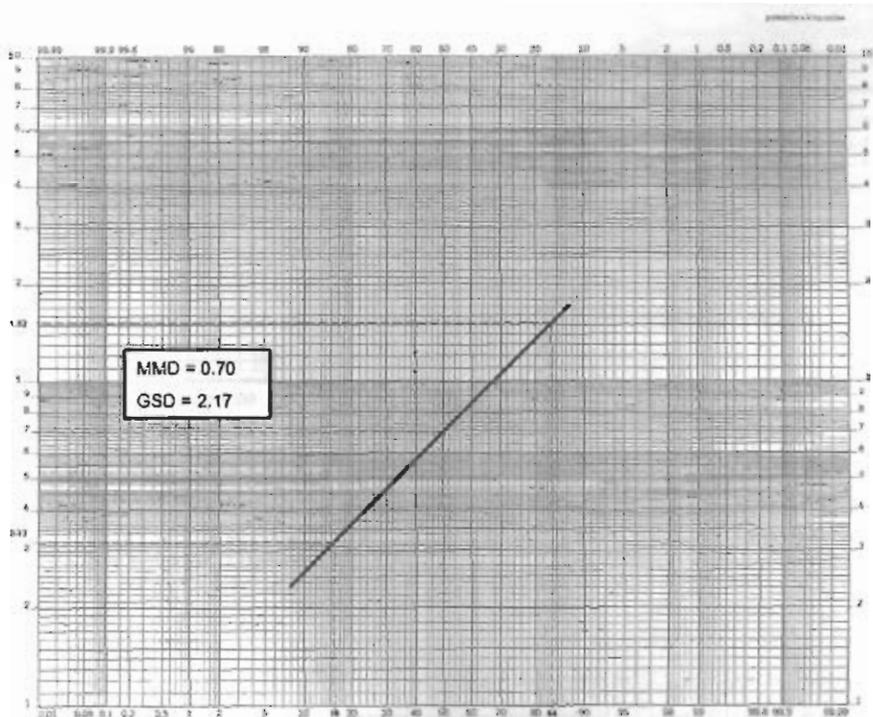


**DISTRIBUCIÓN LOG PROBALISTICA**  
**DE PARTICULAS GRANDES (28-06-02)**

## DATOS DE DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL

### PARTICULAS PEQUEÑAS 04-07-02

1	2	3	4	5	6	7	8
Etapa	Masa Inicial (mg)	Masa Final (mg)	Diferencia (mg)	Fracción de Masa (%)	ECD (µm)	Rango de Tamaño (µm)	Fracción de masa acumulada (%)
6	0,0776	0,0780	0,00040	31,92	0,56	0.56 - 1	100,00
7	0,0789	0,0793	0,00035	28,17	0,32	0.32 - 0.56	68,08
8	0,0787	0,0790	0,00030	23,94	0,18	0.18 - 0.32	39,90
Filtro	0,0716	0,0718	0,00020	15,96	0	0 - 0.18	15,96
			0,00125	100,00			



### DISTRIBUCIÓN LOG PROBALISTICA DE PARTICULAS PEQUEÑAS (04-07-02)

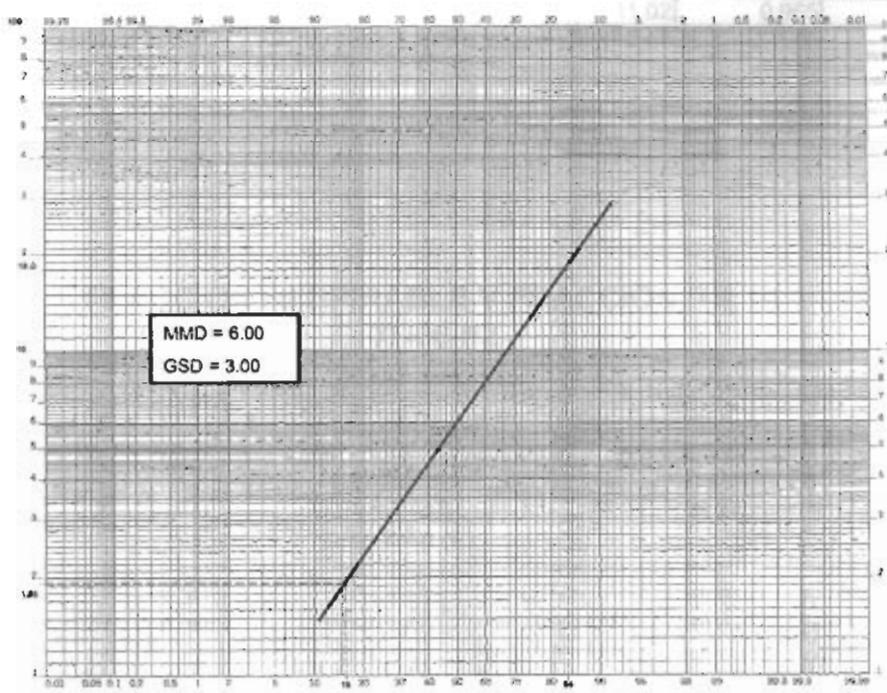
(04-07-02)

## DATOS DE DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL

### PARTICULAS GRANDES 04-07-02

FRACCIÓN PM<sub>10</sub>

1	2	3	4	5	6	7	8
Etapa	Masa Inicial (mg)	Masa Final (mg)	Diferencia (mg)	Fracción de Masa (%)	ECD (μm)	Rango de Tamaño (μm)	Fracción de masa acumulada (%)
0	0,0791	0,0796	0,0005	15,34	18,0	> 18,0	100,00
1	0,0786	0,0792	0,0006	18,40	10	10,0 - 18	84,66
2	0,078	0,0787	0,0007	21,47	5,6	5,6 - 10,0	66,26
3	0,0785	0,0790	0,0005	15,34	3,2	3,2 - 5,6	44,79
4	0,0788	0,0793	0,0005	15,34	1,8	1,8 - 3,2	29,45
5	0,0785	0,0790	0,0005	14,11	1	1 - 1,8	14,11
				0,0033	100,00		



## DISTRIBUCIÓN LOG PROBALISTICA

### DE PARTICULAS GRANDES (04-07-02 )

## APÉNDICE E

### CÁLCULO DE FRACCIÓN RESPIRABLE Y DE LA FRACCIÓN PM<sub>10</sub>

#### TRITURADORA DE YESO

#### FRACCION RESPIRABLE Y FRACCION PM 10 31-05-02

1	2	3	4	5	6	7
Etapa	Rango de Tamaño (µm)	Fracción de Masa (%)	Fracción respirable promedio (fr)	Masa Respirable (%)	Fracción PM 10 promedio (fr)	Masa PM 10 (%)
0	> 18.0	5,71	0,000	0,00	-	-
1	10.0 - 18	6,43	0,002	0,01	-	-
2	5.6 - 10.0	10,00	0,082	0,82	0,082	0,82
3	3.2 - 5.6	7,14	0,370	2,84	0,370	2,84
4	1.8 - 3.2	6,43	0,755	4,85	0,755	4,85
5	1 - 1.8	11,43	0,965	11,02	0,965	11,02
6	0.56 - 1	19,29	1,000	19,28	1,000	19,28
7	0.32 - 0.56	15,71	1,000	15,71	1,000	15,71
8	0.18 - 0.32	12,14	1,000	12,14	1,000	12,14
Filtro	0 - 0.18	5,71	1,000	5,71	1,000	5,71
		100,0		72,20		72,19

#### FRACCION RESPIRABLE Y FRACCION PM 10 07-06-02

1	2	3	4	5	6	7
Etapa	Rango de Tamaño (µm)	Fracción de Masa (%)	Fracción respirable promedio (fr)	Masa Respirable (%)	Fracción PM 10 promedio (fr)	Masa PM 10 (%)
0	> 18.0	7,89	0,000	0,00	-	-
1	10.0 - 18	10,53	0,002	0,02	-	-
2	5.6 - 10.0	10,53	0,082	0,86	0,082	0,86
3	3.2 - 5.6	7,89	0,370	2,92	0,370	2,92
4	1.8 - 3.2	5,26	0,755	3,97	0,755	3,97
5	1 - 1.8	10,53	0,965	10,15	0,965	10,15
6	0.56 - 1	15,79	1,000	15,78	1,000	15,78
7	0.32 - 0.56	13,16	1,000	13,16	1,000	13,16
8	0.18 - 0.32	10,53	1,000	10,53	1,000	10,53
Filtro	0 - 0.18	7,89	1,000	7,89	1,000	7,89
		100,0		65,29		65,27

## TRITURADORA DE ARCILLA

### FRACCION RESPIRABLE Y FRACCION PM 10

14-06-02

1	2	3	4	5	6	7
Etapa	Rango de Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	Fracción de Masa (%)	Fracción respirable promedio (fr)	Masa Respirable (%)	Fracción PM 10 promedio (fr)	Masa PM 10 (%)
0	> 18.0	7,45	0,000	0,00	-	-
1	10.0 - 18	8,51	0,002	0,02	-	-
2	5.6 - 10.0	11,70	0,082	0,96	0,082	0,96
3	3.2 - 5.6	9,57	0,370	3,54	0,370	3,54
4	1.8 - 3.2	10,64	0,755	8,03	0,755	8,03
5	1 - 1.8	14,89	0,965	14,36	0,965	14,36
6	0.56 - 1	11,70	1,000	11,70	1,000	11,70
7	0.32 - 0.56	9,57	1,000	9,57	1,000	9,57
8	0.18 - 0.32	8,51	1,000	8,51	1,000	8,51
Filtro	0 - 0.18	7,45	1,000	7,45	1,000	7,45
		100,0		64,14		64,13

### FRACCION RESPIRABLE Y FRACCION PM 10

21-06-02

1	2	3	4	5	6	7
Etapa	Rango de Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	Fracción de Masa (%)	Fracción respirable promedio (fr)	Masa Respirable (%)	Fracción PM 10 promedio (fr)	Masa PM 10 (%)
0	> 18.0	8,35	0,000	0,00	-	-
1	10.0 - 18	10,44	0,002	0,02	-	-
2	5.6 - 10.0	14,61	0,082	1,20	0,082	1,20
3	3.2 - 5.6	8,35	0,370	3,09	0,370	3,09
4	1.8 - 3.2	10,44	0,755	7,88	0,755	7,88
5	1 - 1.8	12,53	0,965	12,08	0,965	12,08
6	0.56 - 1	12,32	1,000	12,31	1,000	12,31
7	0.32 - 0.56	10,44	1,000	10,44	1,000	10,44
8	0.18 - 0.32	8,35	1,000	8,35	1,000	8,35
Filtro	0 - 0.18	4,18	1,000	4,18	1,000	4,18
		100,0		59,55		59,53

## TRITURADORA DE CALIZA

### FRACCION RESPIRABLE Y FRACCION PM 10

28-06-02

1	2	3	4	5	6	7
Etapa	Rango de Tamaño (µm)	Fracción de Masa (%)	Fracción respirable promedio (fr)	Masa Respirable (%)	Fracción PM 10 promedio (fr)	Masa PM 10 (%)
0	> 18.0	8,57	0,000	0,00	-	-
1	10.0 - 18	9,29	0,002	0,02	-	-
2	5.6 - 10.0	11,43	0,082	0,94	0,082	0,94
3	3.2 - 5.6	10,00	0,370	3,70	0,370	3,70
4	1.8 - 3.2	12,86	0,755	9,71	0,755	9,71
5	1 - 1.8	12,14	0,965	11,71	0,965	11,71
6	0.56 - 1	10,71	1,000	10,71	1,000	10,71
7	0.32 - 0.56	9,29	1,000	9,29	1,000	9,29
8	0.18 - 0.32	8,57	1,000	8,57	1,000	8,57
Filtro	0 - 0.18	7,14	1,000	7,14	1,000	7,14
		100,0		61,78		61,77

### FRACCION RESPIRABLE Y FRACCION PM 10

4-07-02

1	2	3	4	5	6	7
Etapa	Rango de Tamaño (µm)	Fracción de Masa (%)	Fracción respirable promedio (fr)	Masa Respirable (%)	Fracción PM 10 promedio (fr)	Masa PM 10 (%)
0	> 18.0	11,08	0,000	0,00	-	-
1	10.0 - 18	13,29	0,002	0,03	-	-
2	5.6 - 10.0	15,51	0,082	1,27	0,082	1,27
3	3.2 - 5.6	11,08	0,370	4,10	0,370	4,10
4	1.8 - 3.2	11,08	0,755	8,36	0,755	8,36
5	1 - 1.8	10,19	0,965	9,83	0,965	9,83
6	0.56 - 1	8,86	1,000	8,86	1,000	8,86
7	0.32 - 0.56	7,82	1,000	7,82	1,000	7,82
8	0.18 - 0.32	6,65	1,000	6,65	1,000	6,65
Filtro	0 - 0.18	4,43	1,000	4,43	1,000	4,43
		100,0		51,35		51,33

## **APÉNDICE F**

### **NORMA DE Calidad del Aire ambiente**

#### **INTRODUCCIÓN**

La presente norma técnica es dictada bajo el amparo de la Ley de Gestión Ambiental y del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental y se somete a las disposiciones de éstos, es de aplicación obligatoria y rige en todo el territorio nacional.

La presente norma técnica determina o establece:

Los objetivos de calidad del aire ambiente.

Los métodos y procedimientos a la determinación de los contaminantes en el aire ambiente.

#### **OBJETO**

La presente norma tiene como objetivo principal el preservar la salud de las personas, la calidad del aire ambiente, el bienestar de los ecosistemas y del ambiente en general. Para cumplir con este objetivo, esta norma establece los límites máximos permisibles de contaminantes en el aire ambiente a nivel del suelo. La norma también provee los métodos y procedimientos destinados a la determinación de las concentraciones de contaminantes en el aire ambiente.

#### **DEFINICIONES**

Para el propósito de esta norma se consideran las definiciones establecidas en el Reglamento a la Ley de Prevención y Control de la Contaminación, y las que a continuación se indican:

##### **0.1 Aire**

O también aire ambiente, es cualquier porción no confinada de la atmósfera, y se define como mezcla gaseosa cuya composición normal es, de por lo menos, veinte por ciento (20%) de oxígeno, setenta y siete por ciento (77%) nitrógeno y proporciones variables de gases inertes y vapor de agua, en relación volumétrica.

##### **0.2 Combustión**

Oxidación rápida, que consiste en una combinación del oxígeno con aquellos materiales o sustancias capaces de oxidarse, dando como resultado la generación de gases, partículas, luz y calor.

### **0.3 Condiciones de referencia**

Veinticinco grados centígrados (25 °C) y setecientos sesenta milímetros de mercurio de presión (760 mm Hg).

### **0.4 Contaminante del aire**

Cualquier sustancia o material emitido a la atmósfera, sea por actividad humana o por procesos naturales, y que afecta adversamente al hombre o al ambiente.

### **0.5 Contaminantes comunes del aire**

Cualquier contaminante del aire para los cuales, en esta norma, se especifica un valor máximo de concentración permitida a nivel del suelo en el aire ambiente, para diferentes períodos de tiempo.

### **0.6 Contaminante peligroso del aire**

Son aquellos contaminantes del aire no contemplados en esta norma pero que pueden presentar una amenaza de efectos adversos en la salud humana o en el ambiente. Algunos de estos contaminantes, pero que no se limitan a los mismos, son asbesto, berilio, mercurio, benceno, cloruro de vinilo.

### **0.7 Contaminación del aire**

La presencia de sustancias en la atmósfera, que resultan de actividades humanas o de procesos naturales, presentes en concentración suficiente, por un tiempo suficiente y bajo circunstancias tales que interfieren con el confort, la salud o el bienestar de los seres humanos o del ambiente.

### **0.8 Diámetro aerodinámico**

Para una partícula específica, es el diámetro de una esfera con densidad unitaria (densidad del agua) que se sedimenta en aire quieto a la misma velocidad que la partícula en cuestión.

### **0.9 Emisión**

La descarga de sustancias en la atmósfera. Para propósitos de esta norma, la emisión se refiere a la descarga de sustancias provenientes de actividades humanas.

### **0.10 Episodio crítico de contaminación del aire**

Es la presencia de altas concentraciones de contaminantes comunes del aire y por períodos cortos de tiempo, como resultado de condiciones meteorológicas desfavorables que impiden la dispersión de los contaminantes previamente emitidos.

### **0.11 Fuente fija de combustión**

Es aquella instalación o conjunto de instalaciones, que tiene como finalidad desarrollar operaciones o procesos industriales, comerciales o de servicios, y que emite o puede emitir contaminantes al aire, debido a proceso de combustión, desde un lugar fijo o inamovible.

### **0.12 Material particulado**

Está constituido por material sólido o líquido en forma de partículas, con excepción del agua no combinada, presente en la atmósfera en condiciones normales. Se designa como  $PM_{2,5}$  al material particulado cuyo diámetro aerodinámico es menor a 2,5 micrones. Se designa como  $PM_{10}$  al material particulado de diámetro aerodinámico menor a 10 micrones.

### **0.13 Monitoreo**

Es el proceso programado de coleccionar muestras, efectuar mediciones, y realizar el subsiguiente registro, de varias características del ambiente, a menudo con el fin de evaluar conformidad con objetivos específicos.

### **0.14 Norma de calidad de aire**

Es el valor que establece el límite máximo permisible de concentración, a nivel del suelo, de un contaminante del aire durante un tiempo promedio de muestreo determinado, definido con el propósito de proteger la salud y el ambiente. Los límites permisibles descritos en esta norma de calidad de aire ambiente se aplicarán para aquellas concentraciones de contaminantes que se determinen fuera de los límites del predio de los sujetos de control o regulados.

### **0.15 Partículas Sedimentables**

Material particulado, sólido o líquido, en general de tamaño mayor a 10 micrones, y que es capaz de permanecer en suspensión temporal en el aire ambiente.

## **CLASIFICACIÓN**

Esta norma establece los límites máximos permisibles de concentraciones de contaminantes comunes, a nivel del suelo, en el aire ambiente. La norma establece la presente clasificación:

Norma de calidad de aire ambiente

- a. Contaminantes del aire ambiente.
- b. Normas generales para concentraciones de contaminantes comunes en el aire ambiente.
- c. Planes de alerta, alarma y emergencia de la calidad del aire.

- d. Métodos de medición de concentración de contaminantes comunes del aire ambiente.
- e. De las molestias o peligros inducidos por otros contaminantes del aire.

## **REQUISITOS**

### **0.16 Norma de calidad de aire ambiente**

#### **4.1.1 De los contaminantes del aire ambiente**

**4.1.1.1 Para efectos de esta norma se establecen como contaminantes comunes del aire ambiente a los siguientes:**

Partículas Sedimentables.

Material Particulado de diámetro aerodinámico menor a 10 (diez) micrones. Se abrevia  $PM_{10}$ .

Material Particulado de diámetro aerodinámico menor a 2,5 (dos enteros cinco décimos) micrones. Se abrevia  $PM_{2,5}$ .

Óxidos de Nitrógeno:  $NO$  y  $NO_2$ , y expresados como  $NO_2$ .

Dióxido de Azufre  $SO_2$ .

Monóxido de Carbono.

Oxidantes Fotoquímicos, expresados como Ozono.

**4.1.1.2 La Entidad Ambiental de Control verificará, mediante sus respectivos programas de monitoreo, que las concentraciones a nivel de suelo en el aire ambiente de los contaminantes comunes no excedan los valores estipulados en esta norma. Dicha Entidad quedará facultada para establecer las acciones necesarias para, de ser el caso de que se excedan las concentraciones de contaminantes comunes del aire, hacer cumplir con la presente norma de calidad de aire. Caso contrario, las acciones estarán dirigidas a prevenir el deterioro a futuro de la calidad del aire.**

**4.1.1.3 La responsabilidad de la determinación de las concentraciones de contaminantes en el aire ambiente recaerá en la Entidad Ambiental de Control. Los equipos, métodos y procedimientos a utilizarse en la determinación de la concentración de contaminantes, tendrán como referencia a aquellos descritos en la legislación ambiental federal de los Estados Unidos de América (*Code of Federal Regulations, Anexos 40 CFR 50*).**

**4.1.1.4 La Entidad Ambiental de Control deberá demostrar, ante el Ministerio del Ambiente, que sus equipos, métodos y procedimientos responden a los requerimientos descritos en esta norma. De existir alguna desviación con respecto a la norma, se deberá efectuar la debida justificación técnica a fin de establecer la validez, en uso oficial, de los resultados a obtenerse en la medición de concentraciones de contaminantes en el aire ambiente. La información que se recabe, como resultado de los programas públicos de medición de concentraciones de contaminantes comunes del aire, serán de carácter público.**

4.1.1.5 La Entidad Ambiental de Control establecerá sus procedimientos internos de control de calidad y aseguramiento de calidad del sistema de monitoreo de calidad del aire ambiente en la región bajo su autoridad. Así mismo, la Entidad Ambiental de Control deberá definir la frecuencia y alcance de los trabajos, tanto de auditoría interna como externa, para su respectivo sistema de monitoreo de calidad de aire ambiente.

4.1.2 Normas generales para concentraciones de contaminantes comunes en el aire ambiente

4.1.2.1 Para los contaminantes comunes del aire, definidos en 4.1.1, se establecen las siguientes concentraciones máximas permitidas. El Ministerio del Ambiente establecerá la frecuencia de revisión de los valores descritos en la presente norma de calidad de aire ambiente. La Entidad Ambiental de Control utilizará los valores de concentraciones máximas de contaminantes del aire ambiente aquí definidos, para fines de elaborar su respectiva ordenanza o norma sectorial. La Entidad Ambiental de Control podrá establecer normas de calidad de aire ambiente de mayor exigencia que los valores descritos en esta norma nacional, esto si los resultados de las evaluaciones de calidad de aire que efectúe dicha Autoridad indicaren esta necesidad.

Partículas sedimentables.- La máxima concentración de una muestra, colectada durante 30 (treinta) días de forma continua, será de un miligramo por centímetro cuadrado ( $1 \text{ mg/cm}^2 \times 30 \text{ d}$ ).

**Material particulado menor a 10 micrones (PM<sub>10</sub>).**- El promedio aritmético de la concentración de PM<sub>10</sub> de todas las muestras en un año no deberá exceder de cincuenta microgramos por metro cúbico ( $50 \mu\text{g/m}^3$ ). La concentración máxima en 24 horas, de todas las muestras colectadas, no deberá exceder ciento cincuenta microgramos por metro cúbico ( $150 \mu\text{g/m}^3$ ), valor que no podrá ser excedido más de dos (2) veces en un año.

**Material particulado menor a 2,5 micrones (PM<sub>2,5</sub>).**- Se ha establecido que el promedio aritmético de la concentración de PM<sub>2,5</sub> de todas las muestras en un año no deberá exceder de quince microgramos por metro cúbico ( $15 \mu\text{g/m}^3$ ). La concentración máxima en 24 horas, de todas las muestras colectadas, no deberá exceder sesenta y cinco microgramos por metro cúbico ( $65 \mu\text{g/m}^3$ ), valor que no podrá ser excedido más de dos (2) veces en un año.

**Tabla. Métodos de medición de concentraciones de contaminantes comunes del aire**

CONTAMINANTE	NOMBRE, REFERENCIA Y DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO
Partículas Sedimentables	<p><b>Nombre:</b> Método Gravimétrico, mediante Captación de Partículas en Envases Abiertos</p> <p><b>Referencia:</b> Method 502. Methods of Air Sampling and Analysis, 3rd. Edition, Intersociety Committee, Lewis Publishers, Inc. 1988.</p> <p><b>Descripción:</b> Se utilizará un envase, de 15 centímetros de diámetro o mayor, y con altura dos o tres veces el diámetro. La altura del envase, sobre el nivel de suelo, será de al menos 1,2 metros. Las partículas colectadas serán clasificadas en solubles e insolubles. Las partículas insolubles se determinarán mediante diferencia de peso ganado por un filtro de 47 mm, y que retenga aquellas partículas contenidas en el líquido de lavado del contenido del envase. En cambio, las partículas solubles se determinarán mediante la diferencia de peso ganado por un crisol, en el cual se evaporará el líquido de lavado del envase. La concentración total de partículas sedimentables será la suma de partículas solubles e insolubles, normalizadas con respecto al área total de captación del envase.</p>
Material Particulado PM10	<p><b>Nombre:</b> Método Gravimétrico, mediante muestreador de alto caudal o de bajo caudal.</p> <p><b>Referencia:</b> 40 CFR Part 50, Appendix J o Appendix M.</p>

Continua...

...Continuación

**Tabla. Métodos de medición de concentraciones de contaminantes comunes del aire**

CONTAMINANTE	NOMBRE, REFERENCIA Y DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO
Material Particulado PM2,5	<p><b>Descripción:</b> el equipo muestreador, de alto caudal o de bajo caudal, estará equipado con una entrada aerodinámica capaz de separar aquellas partículas de tamaño superior a 10 micrones de diámetro aerodinámico. Las partículas menores a 10 micrones serán captadas en un filtro, de alta eficiencia, y la concentración se determinará mediante el peso ganado por el filtro, dividido para el volumen total de aire muestreado en un período de 24 horas.</p> <p><b>Métodos Alternos:</b> podrán ser también utilizados los denominados métodos de medición continua, tanto del tipo Microbalanza Oscilante como el tipo Atenuación Beta. En el primer caso, el equipo muestreador, equipado con entrada aerodinámica PM10, posee un transductor de masa de las oscilaciones inducidas por el material particulado. En el segundo tipo, el equipo muestreador, con entrada PM10, contiene una fuente de radiación beta que determina la ganancia de peso en un filtro, a medida que este experimenta acumulación de partículas.</p> <p><b>Nombre:</b> Método Gravimétrico, mediante muestreador de bajo caudal.</p> <p><b>Referencia:</b> 40 CFR Part 50, Appendix J o Appendix L.</p> <p><b>Descripción:</b> el equipo muestreador, de bajo caudal, estará equipado con una entrada aerodinámica capaz de separar aquellas partículas de tamaño superior a 2,5 micrones de diámetro aerodinámico. Las partículas menores a 2,5 micrones serán captadas en un filtro, y la concentración se determinará mediante el peso ganado por el filtro, dividido para el volumen total de aire muestreado en un período de 24 horas.</p> <p><b>Métodos Alternos:</b> podrán ser también utilizados los denominados métodos de medición continua, del tipo Microbalanza Oscilante o del tipo Atenuación Beta, según se describió para material particulado PM10.</p>

## **BIBLIOGRAFÍA**

- 1. AMERICAN INDUSTRIAL HYGIENE ASSOCIATION**, "Particle Size - Selective Aerosol Sampling in the Workplace". AIHA, Fairfax, USA, 1996.
- 2. COOK JEFFREY, OSLUND WILLIAM & FRANK NEIL**, "Evaluation of Fine Particulate Samplers (PM<sub>2.5</sub>) in an Area of Volatile Constituents", AWMA International Speciality Conference Particulate Matter: Health and Regulatory Issues, Pittsburgh, USA, 1995.
- 3. CHANG MINGCHIH, KIM SEONGHEON & SIOUTAS CONSTANTINOS**, "Experimental Studies On Particle Impaction And Bounce: Effects Of Substrate Design And Material", Elsevier Science Publishing Co. Inc, Los Angeles, USA, 1999.

- 4. DURBIN THOMAS, TRUEX TIMOTHY & NORBECK JOSEPH,** "Particulate Measurements and Emissions Characterization of Alternative Fuel Vehicle Exhaust", Center for Environmental Research and Technology College of Engineering, University of California Riverside, USA, 1998.
- 5. FUCHS, N.A.** "Mechanics of Aerosols", Pergamon Press, New York, USA, 1964.
- 6. GEBHART J, WILLEKE K. & BARON P.A.** "Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications", Van Nostrand Reinhold editors, New York, USA, 1993, 313 - 344.
- 7. HEINTZENBERG, J,** "Determination In Situ Of The Size Distribution Of The Atmospheric Aerosol", Aerosol Sci, Los Angeles, USA, 1975, 291-303.
- 8. HINDS, W.C.,** "Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles", John Wiley & Sons, New York, USA, 1982.
- 9. LATHAM JOHN PAUL, MUNJIZA ANTE & LU YANG,** "On The Prediction Of Void Porosity And Packing Of Rock Particulates", Elsevier Science Publishing Co. Inc, Londres, Inglaterra, 2001.

**10. MARPLE VIRGIL, BEHN STEVEN & RUBOW KENNETH**, "A Microorifice Uniform Deposit Impactor (MOUDI): Description, Calibration and Use", Elsevier Science Publishing Co. Inc., Minneapolis, USA, 1991, 434 – 446.

**11. NEWTON, CHENG, BARR, & YEH**, "Effects of Collection Substrates on Performance and Wall Losses in Cascade Impactor". *Journal of Aerosol Science* 21, 467–470, 1990.

**12. PUI DAVID Y. & LIU BENJAMIN Y.**, "Advances in Instrumentation for Atmospheric Aerosol Measurement", Universidad de Minnesota, Laboratorio de Tecnología de Partículas, USA, 1986.

**13. RAO A.K. & WHITBY K.T.**, "Non-Ideal Collection Characteristics Of Inertial Impactors: Single Stage Impactors And Solid Particles", *J. Aerosol Sci.*, 9, 77-86, Los Angeles, USA, 1978.

**14. RUBOW, K.L., MARPLE V.A, OLIN J. & MCCAWLEY M.A**, "A Personal Cascade Impactor: Design, Evaluation And Calibration", *Am. Ind. Hyg. Assoc. J*, USA, 1987, 532 – 538.

**15. WALL S., ONDO J. L. & WINKLMAYR W.,** "Modes in the Size Distributions of Atmospheric Inorganic Aerosol." Atmospheric Environment, New York, USA, 2349-2359, 1990.

**16. WOHLETZ KENNETH & BROWN WILBUR,** "Particulate Size Distributions And Sequential Fragmentation / Transport Theory", Santa Barbara, USA, 1995.