

UCH-FC
Q. Ambiental
P438a
C.1



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA PREGRADO

**"ANÁLISIS Y ESTUDIO DEL MATERIAL PARTICULADO GENERADO EN EL
MURO PRINCIPAL DEL TRANQUE DE RELAVE LAS TÓRTOLAS"**

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en el cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de:

Química Ambiental

VICTORIA PÉREZ RIVEROS

Director del Seminario de Título

Carla Díaz

Profesor Patrocinante

Antonio Galdámez

Noviembre de 2013

Santiago-Chile



UNIVERSIDAD DE CHILE

INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por la Srta. Victoria Marisol Pérez Riveros.

"ANÁLISIS Y ESTUDIO DEL MATERIAL PARTICULADO GENERADO EN EL MURO PRINCIPAL DEL TRANQUE DE RELAVE LAS TORTOLAS"

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Química Ambiental.

COMISIÓN DE EVALUACIÓN

Sra. Carla Díaz

Directora Seminario de Título

Dr. Antonio Galdámez

Profesor Patrocinante

Mag. Julio Hidalgo

Corrector

Dr. Richard Toro

Corrector

Santiago de Chile, Noviembre 2013



Gracia a mis padres

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por todo el amor y apoyo incondicional.

Agradecer especialmente a Carla Díaz, mi tutora en la empresa, por su disponibilidad y simpatía y por darme la posibilidad y libertad de crear mis propias ideas en el estudio.

A Carmen Rocha, por toda su ayuda en terreno, su disponibilidad y simpatía.

A mis Profesores que me entregaron los conocimientos técnicos para emplear metodologías científicas en la resolución de problemas prácticos y cotidianos.

A mi Profesor patrocinante, Antonio Galdámez.

A mis Profesores correctores.





ÍNDICE DE CONTENIDOS

	ÍNDICE DE CONTENIDOS	v
	Resumen	xix
	Abstract	xxi
I	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Sector Minero	1
1.2	AngloAmerican	2
1.3	Mínera Los Bronces	3
1.4	Planta Las Tórtolas	4
1.5	El relave y su composición	5
1.6	Disposición de relaves	7
1.7	Depósitos de relaves	9
1.8	Depósitos de relave y medio ambiente	10
1.9	Tranques de relaves	12
1.9.1	Disposición "Muro de contención" y Métodos de Construcción	14
1.9.2	Disposición "Tratamiento equivalente a un Suelo Húmedo"	16
1.10	Relave Integral	17
1.11	Relaves Espesados	18
1.11.2	Ventajas ambientales y operacionales del método TTD	22
1.12	Relaves en Pasta	23
1.13	Relaves Filtrados	25
1.14	Antecedentes Generales del Tranque de relave Las Tórtolas	27

1.14.1	Criterios de diseño	29
1.14.2	El entorno territorial, climatológico y meteorológico de la zona del Tranque de relave Las Tórtolas	30
1.14.2.1	Entorno territorial	30
1.14.2.2	Entorno climatológico y meteorológico	31
1.14.3	Sistema de Control de Infiltraciones	32
1.14.4	Sistema de depositación y compactación	32
1.14.5	Sistema de riego	33
1.15	Erosión eólica	34
1.15.1	Alternativas de mitigación de la erosión eólica en Tranques de relave mediante la estabilización	36
1.15.2	Estabilización mecánica	36
1.15.3	Estabilización química	37
1.15.4	Estabilización microbiana de suelos	37
1.15.5	Fitoestabilización de suelos	38
1.16	Material particulado	38
1.16.1	Fuentes de material particulado	40
1.16.2	Efectos sobre la salud	41
1.17	Problemática	42
1.18	OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS	44
1.8.1	Objetivo General	44
1.8.2	Objetivos Específicos	44
II	MATERIALES Y MÉTODOS	45
2	Antecedentes	45



2.1	Área de muestreo	45
2.1.1	Tipos de muestreo	45
2.1.2	Toma de muestras y preservación	46
2.1.3	Análisis de laboratorio	46
2.2	Factores de muestreo	46
2.2.1	Tiempos de operación	46
2.2.2	Dimensiones del Muro	47
2.2.3	Autorizaciones	47
2.2.4	Condiciones climáticas	47
2.2.5	Sistema de riego	47
2.3	Medición de partículas de saltación y arrastre	47
2.4	Muestreo de las trampas de Leatherman	50
2.5	Medición de material particulado	51
2.6	Muestreo para la medición de material particulado	52
2.7	Medición puntual de los vientos	54
2.8	Medición de altura y coordenadas	56
2.9	Pesaje de muestras	56
2.10	Muestreo de arenas de relave	56
2.11	Metodología para el análisis mineralógico y microscópico	58
2.12	Metodología para el análisis químico	58
2.13	Metodología para el análisis granulométrico	58
III	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60

3.1	Caracterización físico-química de las arenas de relave del Tranque de relave Las Tórtolas	60
3.1.1	Análisis granulométrico	60
3.1.2	Análisis mineralógico	71
3.1.3	Análisis microscópico	75
3.1.4	Análisis químico	80
3.2	Evaluación del efecto eólico en el Tranque de relave Las Tórtolas	81
3.2.1	Erosión en Tranques de relave	81
3.2.2	La actividad morfogenética del viento	87
3.2.3	Determinación del perfil de velocidad del viento en Tranque de relave	93
3.2.4	Obtención de los perfiles de viento	95
3.2.5	Determinación de la velocidad umbral de fluido	98
3.2.6	Determinación de la velocidad umbral de impacto	99
3.2.7	Determinación de la altura de erosión	99
3.3	Trampas de saltación pasiva (Leatherman)	102
3.4	Discusión Trampas de Leatherman	103
3.4.1	Sector 1-A	103
3.4.2	Sector 1-B	104
3.4.3	Sector 2-A.	105
3.4.4	Sector 2-B	106
3.4.5	Sector 3	106
3.5	Medición de material particulado	109
3.6	Discusión material particulado	109

3.6.1	Sector 1-A y Sector 1-B	110
3.6.2	Sector 2-A	111
3.6.3	Sector 2-B	111
3.6.4	Sector 3	112
3.6.5	Mediciones fuera del muro	114
IV	CONCLUSIONES	117
4.1	Conclusiones Trampas de Leatherman	117
4.2	Conclusiones Material particulado	117
V	RECOMENDACIONES	119
5.1	Estación de monitoreo	119
5.2	Barreras mecánicas (paneles)	120
5.3	Sistema de riego	124
5.4	Sistemas operacionales	127
5.5	Recomendaciones futuras	127
VI	REFERENCIAS	129
VII	ANEXOS	130
Anexo A	Descripción de los componentes principales de un depósito de relaves y otros conceptos importantes	131
Anexo B	Trampas de Leatherman	135
	Muestreo General de Trampas de Leatherman	136
	Horarios de muestreo de PM, dentro y fuera del muro	137
	Plan maestro de muestreo PM	139

	Coordenadas y posicionamiento de trampas colocadas	140
	Masa recolectada de cada una	140
Anexo C	Antecedentes de factores relevantes que afectan la erosión eólica del Tranque de relave Las Tórtolas	148
	Rosas de los vientos de cada mes del año 2005	149
	Rosa del viento total del año 2005	150
	Gráfico Temperatura y Velocidad Máxima del viento del año 2007	151
	Gráficos de Temperatura y Velocidad máxima del viento en el Tranque de relave Las Tórtolas (años 2010, 2011 y 2012)	153
Anexo D	Material particulado	154
	Gráficos de Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) v/s Tiempo (Hora) de las mediciones de material particulado	155
	Tablas con valores de moda, máxima, mínima y promedio de las mediciones de material particulado	155
Anexo E	Tablas de referencia	183



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Operaciones Unitarias de Planta Las Tórtolas	4
Tabla 2	Pendiente límite de una pulpa de relave para distintas concentraciones de sólido en peso	17
Tabla 3	Fechas de muestreo de las Trampas de Leatherman y su correspondiente sector.	50
Tabla 4	Enumeración de muestras y cuarteo para el muestreo de arenas de relave.	57
Tabla 5	Ejemplo de distribución granulométrica, representada en forma tabulada. Corresponde a un promedio final de 12 muestras analizadas del Sector 2-A, sacadas a una profundidad de 0,3 y 0,6 m de profundidad	60
Tabla 6	Propiedades de gradación de relave integral	66
Tabla 7	Porcentajes ponderados de diámetros representativos de la muestra	68
Tabla 8	Clasificación de suelos por el USCS	70
Tabla 9	Resumen análisis mineralógico	73
Tabla 10	Resultados de análisis químico, leyes de CuT, Cu Sol, Fe, Mo y As	80
Tabla 11	Relación entre el tamaño de las partículas y la velocidad necesaria para lograr su movimiento	90
Tabla 12	Velocidades máximas promedio definitivas	96
Tabla 13	Valores del exponente p	96
Tabla 14	Comparación del exponente p in situ y bibliografía	97
Tabla 15	Parámetros para determinar la velocidad umbral de fluido	97
Tabla 16	Medidas de tendencia central y variabilidad de la velocidad umbral de impacto	99
Tabla 17	Comparación de velocidades medidas in situ y teórica	99
Tabla 18	Medidas de tendencia central y variabilidad de la velocidad de umbral de impacto a 1,5 m de altura	100
Tabla 19	Velocidades reales y teóricas entregadas por el perfil de viento seleccionado.	101
Tabla 20	Masa Total del Muestreo en los diferentes sectores del Muro	108

Tabla 21	Coordenadas y posicionamiento de trampas en S1-A	140
Tabla 22	Masa Neta de trampas del S1-A	140
Tabla 23	Coordenadas y posicionamiento de trampas en S1-B	141
Tabla 24	Peso Neto de trampas del S1-B	141
Tabla 25	Coordenadas y posicionamiento de trampas en S2-A	142
Tabla 26	Peso Neto de trampas del S2-A	142
Tabla 27	Coordenadas y posicionamiento de trampas en S2-B	143
Tabla 28	Peso Neto de trampas del S2-B	143
Tabla 29	Coordenadas y posicionamiento de trampas en S3	144
Tabla 30	Peso Neto de trampas del S3	144
Tabla 31-49	Estadísticas de las mediciones de material particulado	155- 169
Tabla 50-52	Tablas de referencia	183- 184

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Producción Chilena de Cobre de mina, de los años 1950-2011	1
Figura 2	Esquema de proceso de producción de cobre	2
Figura 3	Diagrama Operacional de División de los Bronces	4
Figura 4	Diagrama Operacional de la planta de flotación Las Tórtolas	5
Figura 5	Esquema Extracción del Mineral	6
Figura 6	Esquema de la composición de un Tranque de Relaves	13
Figura 7	Métodos Constructivos del muro de Arenas de Tranque de Relaves	15
Figura 8	Curva de Robinsky, relación entre la pendiente de depositación y el porcentaje de sólidos de la pulpa	19
Figura 9	Método de desplazamiento Discontinuo de relaves espesados	20
Figura 10	Depósito domo por sectores de relaves espesados	20
Figura 11	Método de desplazamiento Continuo de relaves espesados	21
Figura 12	Esquema de disposición de Relaves Espesados	21
Figura 13	Depósitos de Relave Convencional y Espesado en Distintas Topografías	21
Figura 14	Depositación de Relaves Filtrados	26
Figura 15	Tipos de relaves junto a sus características de depositación	26
Figura 16	Imagen del Tranque de relave Las Tórtolas	28
Figura 17	Esquema General Depósito Las Tórtolas	28
Figura 18	Método Constructivo Aguas Abajo del Muro Principal de arenas del Tranque de Relaves Las Tórtolas	30
Figura 19	Entorno territorial del Tranque de relave Las Tórtolas	31
Figura 20	Diagrama de disposición de las arenas y agua recolectada del muro principal Las Tórtolas	32
Figura 21	Fotografías de la depositación y compactación de arenas, respectivamente	33

Figura 22	Fotografías del sistema de riego	34
Figura 23	Escala gráfica de tamaños del material particulado (PM_{10} , $PM_{2,5}$) y arena fina en comparativa con el tamaño de un cabello humano	40
Figura 24	Representación de las zonas comprometidas y formas de inhalación en el cuerpo humano por el material particulado	41
Figura 25	Esquema de mecánica de la erosión eólica	42
Figura 26	Fotografía de la problemática generada en el muro principal; arrastre de material particulado	43
Figura 27	Representación de sectores del Muro Principal Las Tórtolas dividido por los sectores operacionales de la empresa	45
Figura 28	Representación de trampa de saltación pasiva (trampa de Leatherman).	49
Figura 29	Diferentes estados de las arenas; 1: Arena recientemente depositada, 2: Arena seca depositada, 3: Arena suelta, 4: Arena compactada seca.	49
Figura 30	Procesos de metodología para las trampas de Leatherman	51
Figura 31	Equipo Dustmate para la determinación de material particulado (PST , PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_1).	52
Figura 32	Puntos de muestreo de medición de material particulado y velocidad de los vientos, dentro del muro; en los diferentes sectores	54
Figura 33	Puntos de muestreo de medición de material particulado y velocidad de los vientos, fuera del muro; cerro a 600 metros del muro, puente dren basal a 300 metros del muro y cubeta cercano al coronamiento de S3	54
Figura 34	Anemómetro, instrumento de medición de velocidad puntual de los vientos	55
Figura 35	Representación de Muro Principal Las Tórtolas dividido en 4 zonas; Coronamiento, Talud 2/3, Talud 1/3 y Pies del Muro	55
Figura 36	GPS Modelo GARMIN III	56
Figura 37	Representación de cuarteo de sectores en el muro principal	57
Figura 38	Representación de microscopio, junto a la briqueta que contiene la muestra a analizar	58
Figura 39	Distribuciones granulométricas típicas de relaves de Cobre	62
Figura 40	Curva granulométrica de las arenas del Muro Principal Las Tórtolas	62
Figura 41	Curva granulométrica del Muro Principal del año 2010	63
Figura 42	Curva granulométrica del Muro Principal del año 2011	63

Figura 43	Curva granulométrica del Muro Principal del año 2012	64
Figura 44	Curva Granulométrica Muro Principal del mes de Julio del 2012	65
Figura 45	Fracción Retenida en porcentaje de partículas presentes en el muro principal	69
Figura 46	Clasificación de suelo (Textura) del muro principal	70
Figura 47	Mineralogía Planta Las Tórtolas	72
Figura 48	Análisis mineralógico de las arenas de relave	73
Figura 49	Grados de redondez para suelos con (a) alta y (b) baja esfericidad	74
Figura 50	Estructuras que dan cohesión a suelos granulares. Se muestra el efecto de partículas con textura angular (a) y con textura redondeada (b)	75
Figura 51	Presencia de Mo en ganga de 150 micrones	77
Figura 52	Presencia de calcopirita, covalina, calcosina y trazas de enargita en ganga de 15 micrones	78
Figura 53	Presencia de calcopirita y calcosina en ganga de 15 micrones	78
Figura 54	Presencia de calcopirita, calcosina y trazas de enargita en ganga de 17 micrones	79
Figura 55	Presencia de calcosina y trazas de limonita y enargita en ganga de 75 micrones	79
Figura 56	Representación de un perfil de viento, correspondiente a la velocidad del viento en función de la altura	83
Figura 57	Incorporación de una partícula a una corriente de aire	88
Figura 58	Secuencia de erosión eólica	89
Figura 59	Relación entre tamaño del grano, velocidad umbral de fluido y velocidad umbral de impacto	93
Figura 60	Fotografía de Cárcava en el muro	95
Figura 61	Perfil de variación de velocidad real del viento en el tranque con la altura	96
Figura 62	Velocidad umbral de fluido en función de los diámetros de la arena	98
Figura 63	Perfil seleccionado velocidad v/s altura para el tranque Las Tórtolas	101
Figura 64	Muestreo general de trampas de arena, junto con la división de los sectores del Muro	103

Figura 65	Distribución de masa de trampas en S1-A	104
Figura 66	Distribución de masa de trampas en S1-B	105
Figura 67	Distribución de masa de trampas en S2-A	105
Figura 68	Distribución de masa de trampas en S2-B	106
Figura 69	Distribución de masa de trampas en S3	107
Figura 70	Demostración de la dirección del viento proveniente de la cubeta en diferentes horarios de la tarde. En gris se muestra la dirección aproximada del viento que comienza desde las 16:00 horas hasta las 19:00 horas. En rojo se muestra que cambia levemente la dirección del viento hacia el sector 2-B	108
Figura 71	Distribución de masa total de las trampas en los diferentes sectores del muro	109
Figura 72	Promedios de PM ₁₀ de mediciones en horario de la mañana y de tarde del S1-A	110
Figura 73	Promedio de PM ₁₀ de medición en horario de la mañana del S1-B	110
Figura 74	Promedios de PM ₁₀ de mediciones en diferentes horarios del S2-A	111
Figura 75	Promedios de PM ₁₀ en mediciones de horario de la tarde en S2-B	112
Figura 76	Promedios de PM ₁₀ de mediciones en diferentes horarios del S3	113
Figura 77	Mediciones de promedios de PM ₁₀ fuera del muro; punto cercano a coronamiento S3, puente cercano a dren basal (300 metros), cerro (600 metros)	115
Figura 78	Ciclo diario de rapidez del viento	115
Figura 79	Gráfica de zona propuesta para una nueva estación de monitoreo o del traslado de la estación actual	119
Figura 80	Gráfica de posicionamiento de paneles en el Muro, se observan dos zonas; coronamiento y zona anexa a coronamiento	121
Figura 81	Diseño de quebraviento de madera, junto a sus medidas y materiales, además del diseño de planta eje longitudinal	122
Figura 82	Diseño de quebraviento de policarbonato, junto a sus medidas y materiales, además del diseño de planta eje longitudinal	123
Figura 83	Imagen de riego no homogéneo en coronamiento de sector 2-B y sector 3	125
Figura 84	Representación de zona que preferentemente el riego debiera ser enfatizado	125

Figura 85	Sistema de riego móvil Pivot	126
Figura 86	Árboles que se utilizan en agricultura y otras diciplinas como barreras naturales contra el viento	128
Figura 87-90	Gráficos de Temperatura, año 2007 y años 2010,2011 y 2012	151-153
Figura 91-150	Gráficos de mediciones de material particulado	155-181

LISTA DE ABREVIATURAS

S1-A: Sector operacional 1-A del muro principal del Tranque de relave Las Tórtolas.

S1-B: Sector operacional 1-B del muro principal del Tranque de relave Las Tórtolas.

S2-A: Sector operacional 2-A del muro principal del Tranque de relave Las Tórtolas.

S2-B: Sector operacional 2-B del muro principal del Tranque de relave Las Tórtolas.

S3: Sector operacional 3 del muro principal del Tranque de relave Las Tórtolas.

T_n: Trampas de saltación pasiva (Leatherman).

PM₁: material particulado de diámetro aerodinámico de 1 micron.

PST: partículas suspendidas totales.

USCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

TTD: Disposición de relaves espesados.

Resumen

El Tranque de relave Las Tórtolas está ubicado en la Comuna de Colina, Provincia de Chacabuco, Región Metropolitana, construido con los relaves provenientes de la mina Los Bronces de la Compañía Anglo American Sur S.A. Sus coordenadas geográficas son: 75°45' de Longitud Oeste y 33°08' de Latitud Sur.

Este Tranque está conformado por un muro principal construido artificialmente con la fracción gruesa de los relaves que junto a los cerros naturales que lo rodean, forman una cubeta o embalse donde se depositan las fracciones más finas del relave y también permite almacenar el agua necesaria para el proceso de producción de cobre.

Debido a la estructura del material de relave, constituido principalmente de arenas finas, y sumado a eventos de altas temperaturas; el material pierde su humedad y por consiguiente su cohesión, quedando expuesto a la acción del viento. Ésta situación provoca, eventualmente, que se genere un levantamiento del material particulado afectando parámetros operacionales y daños ambientales. Actualmente, como medida de mitigación de este efecto, se utiliza la técnica de riego mediante aspersores con agua extraída directamente de la cubeta y, de esta manera, se logra mantener la humedad de la superficie del muro.

Este trabajo se realizó para analizar y estudiar el sistema actual de abatimiento de material particulado en el muro mediante riego y la composición del material, incluyendo su medición y comportamiento. Para cumplir tal objetivo, el trabajo consistió en cuantificar las partículas de saltación y arrastre (peso en gramos) mediante trampas de saltación pasiva, llamadas trampas de Leatherman. Por otra parte, la medición de las partículas en suspensión (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) se realizó con el instrumento Dustmate, que permite medir el material particulado (PST, PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, PM_1). El muestreo del material abarcó los 5 sectores operacionales emplazados en la superficie del muro, y 3 puntos adicionales alejados del muro, de tal manera de analizar el comportamiento del material en el muro y fuera de éste. En ambos casos, se midió la velocidad del viento mediante un anenómetro.

En función de las mediciones de material particulado en los distintos sectores y los resultados obtenidos, se puede indicar lo siguiente:

- a) Existen 2 sectores con altas concentraciones de partículas en suspensión, arrastre y saltación.
- b) Existen 2 sectores con bajas concentraciones y se clasifican como sectores en calma.
- c) Existe 1 sector definido como comportamiento intermedio.

Cabe hacer presente que los sectores que concentran los índices más altos de concentración se ven afectados directamente por la entrada del viento a la cubeta.

En función de las mediciones efectuadas en terreno y el análisis de los resultados; se concluyen recomendaciones para el mejoramiento del sistema actual de riego para el abatimiento del material particulado.

Finalmente, este estudio termina proponiendo el traslado de la estación de monitoreo actual a una zona representativa de medición. Además, teniendo en cuenta que la acción del viento es el principal factor en la remoción del material que contiene el tranque de relave, se propone complementar el sistema actual basado en el riego, con barreras mecánicas que desvíen o dirijan el viento.

Abstract

The tailings dam Las Tórtolas, is located in the municipality of Colina, Province of Chacabuco, Metropolitan Region, built with tailings from the mine Los Bronces of the Anglo American Sur S.A company. Its geographical coordinates are: 75 ° 45' West Longitude and 33°08' South Latitude.

The dam has a retaining wall built by tailings sand, corresponding to the coarse fraction of the tailings. With the natural surrounding hills, it forms a dam that contains the finer fraction of the tailings, plus the final water of the mining process, wich is recirculated to the Flotation Plant for his recirculation. Due to its structure, composed mainly of fine sand and adding high temperatures, the material dries, loosing humidity, consequently reducing its cohesion, leaving the tailings vulnerable to the exposure to the wind. This leads, eventually, to generate a lift of particule matter, affecting operational parameters and producing environmental damage. Currently, as mitigation for this effect, the technique used is the sprinkler irrigation with water drawn from the dam.

The dam is formed by a retaining wall built artificially with the coarse fraction of the tailings and with the natural surrounding hills, this forms a dam that contains the finer fraction of the tailings and also allows to retain the necessary water for the cupper production process.

Due to the structure of the tailings, composed mainly of fine sand and adding high temperatures; the material dries, loosing humidity and consequently reducing its cohesion, leaving the material vulnerable to the exposure of the wind. This leads, eventually, to generate a lift of particulate matter, affecting operational parameters and producing environmental damage. Currently, as a mitigation for this effect, the technique used is the sprinkler irrigation with water drawn from the dam, this way, is possible to maintain the humidity of the wall surface.

The present investigation has the main objective to analyze and study the current

irrigation system as particulate matter mitigation solution in the wall and the detailed study of the origin of the particulate matter, including his measurement and behavior. To fulfill this objective, it was quantified saltation and drag particles (weight in grams) by passive saltation tramps, called Leatherman tramps. Moreover, the measurement of the suspended particles (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$) was performed by the Dustmate instrument, that measures particulate matter (PST, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, PM_1).). The measurement of the material covered the five operational sectors of the wall, plus tree point away from the wall, to analyze the behavior of the material outside it. In both cases, the wind velocity was measured by a wind anemometer.

Based on measurements of particulate matter in the different sectors and the results obtained, it can indicate the following:

- a) There are two sectors with high concentrations of suspended, drag and saltation particles.
- b) There are two sectors with low concentrations and they are classified as calm.
- c) There is one sector defined as intermediate behavior.

It should be mentioned that the sectors that concentrate the highest concentration are directly affected by the wind that enters from the dam.

Due to the field measurement and the analysis of the results, it was concluded recommendations for improving the current system of irrigation for the abatement of particulate matter.

Finally, this study concludes by proposing the transfer of the current monitoring station to measuring a representative area. Furthermore, considering that the wind is the main factor in the removal of material contained in the dam, aims to complement the current system based on irrigation with mechanical barriers that divert or redirect the wind.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Sector minero

El sector minero chileno por muchos años, ha estado constituido fundamentalmente por productores de Cobre, y en menor medida de Oro, Plata y otros minerales, constituyéndose históricamente en la actividad productiva más importante para la economía del país. En la minería chilena se pueden identificar tres segmentos: la gran minería, la mediana minería y la minería pequeña y artesanal. La minería estatal la llevan a cabo a gran escala La Corporación Nacional del Cobre (CODELCO) y la Empresa Nacional de Minería (ENAMI). En la minería privada operan empresas relacionadas con los tres segmentos mencionados (Espinace, R. y col, 2006).

En Chile la producción de cobre de mina ha subido considerablemente desde los años 50, desde 362,9 miles de toneladas del año 1950 a 5.557 miles de toneladas al año 2007. Esta producción de cobre representa el 35,7% de la producción mundial de metales.

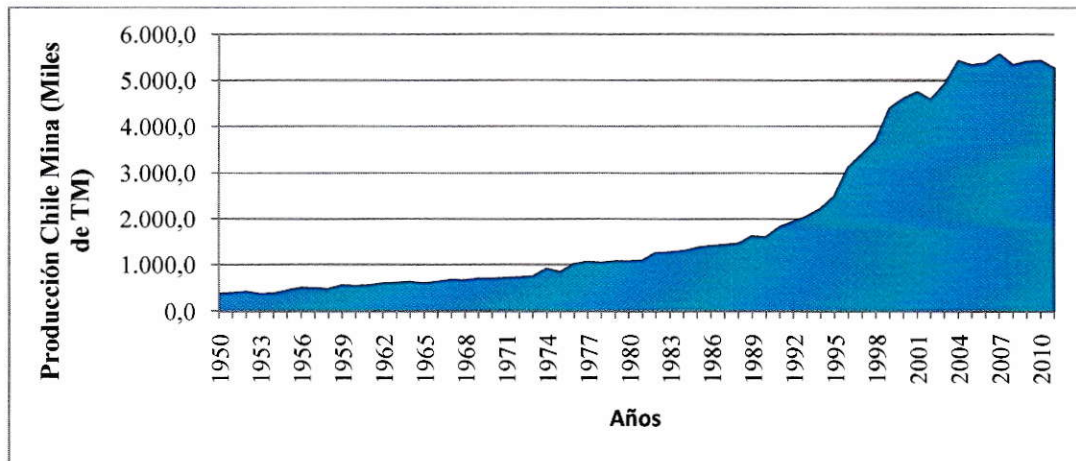


Figura 1. Producción Chilena de Cobre de mina, de los años 1950-2011.

El Cobre se presenta en forma de óxidos o sulfuros, utilizando el proceso de lixiviación y el de flotación respectivamente, como métodos de concentración. El

material en forma de sulfuro y de óxidos cuenta con porcentajes diversos de cobre (ley).

El proceso de producción del Cobre en forma de sulfuros contempla de manera resumida, las etapas que a continuación se mencionan:

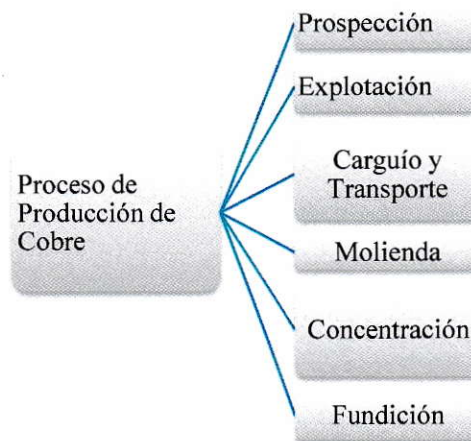


Figura 2. Esquema de proceso de producción de cobre.

La explotación y producción minera genera significativos volúmenes de residuos provenientes de distintas etapas de la explotación. Primero está la formación de estériles, material removido del yacimiento que no entra en proceso de beneficio. Luego de los diferentes procesos de extracción de minerales (amalgamación, lixiviación y flotación) se generan como residuos principales, las escorias, ripsos de lixiviación y relaves. Este trabajo trata específicamente del último proceso de explotación y producción minera correspondiente a los relaves de cobre.

1.2. Anglo American

Anglo American Chile es una empresa minera dedicada a la explotación, desarrollo, procesamiento y comercialización de cátodos de cobre, ánodos y blíster, concentrados de Cobre, Molibdeno y Ácido Sulfúrico. Forma parte del Grupo Anglo American y opera en Chile desde 1980. Actualmente está conformada

por 5 divisiones productivas (Los Bronces, El Soldado, Mantos Blancos, Mantoverde y Fundición Chagres) que operan en la zona centro y norte de Chile, una oficina central en Santiago y la unidad de exploraciones mineras Anglo American Exploration Division.

Además, posee 44% de la propiedad de Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi y la subsidiaria Scaw International, que ha sido identificada para la venta.

Anglo American Chile, es una empresa que posee tres complejos mineros de alta producción, clasificadas como de gran minería, incluyendo Los Bronces ubicada en la Región Metropolitana.

1.3. Minera Los Bronces

Los Bronces es una mina de Cobre y Molibdeno que se explota a rajo abierto. Se encuentra ubicada en la Región Metropolitana, a 65 kilómetros de Santiago y a 3.500 m.s.n.m. En la mina se produce cobre en cátodos. El mineral que se extrae es molido y transportado por un mineroducto de 56 kilómetros de longitud a la planta de flotación Las Tórtolas, en la que se produce concentrado de cobre y de molibdeno.

El mineral proveniente de la mina Los Bronces, contiene mineral oxidado y sulfurado. El mineral oxidado que se extrae es conducido a la planta de Cátodos San Francisco, donde encontramos los procesos de lixiviación, extracción por solvente y electro-obtención. El mineral sulfurado es conducido a la planta Los Bronces para su extracción. En la Fig. 3 se muestra gráficamente el sistema de producción de la minera Los Bronces.

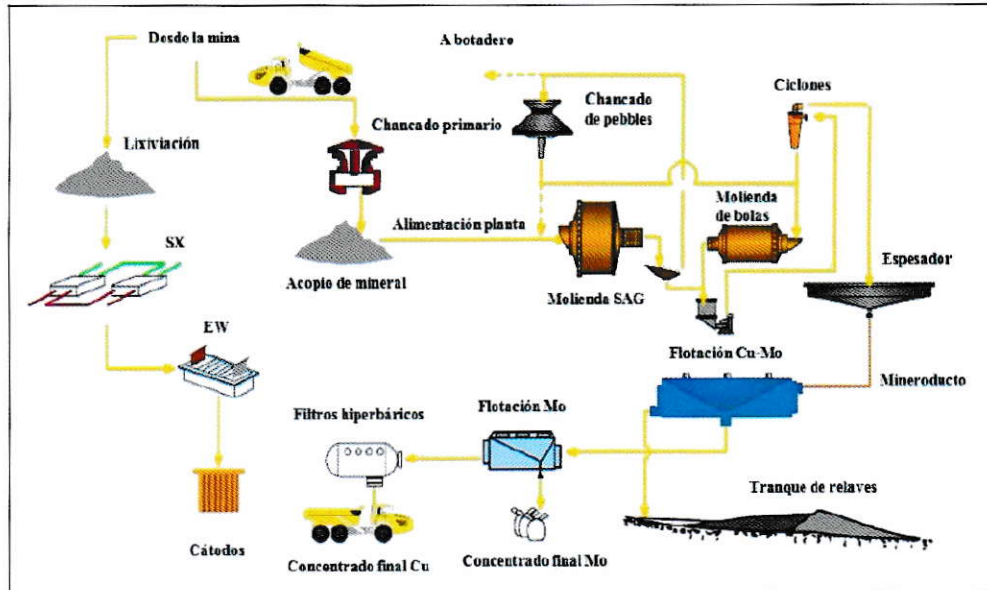


Figura 3. Diagrama Operacional de División de los Bronces.

1.4. Planta Las Tórtolas

La Planta Las Tórtolas está ubicada 40 km al norte de Santiago, en comuna de Colina. En ella se desarrollan las siguientes operaciones unitarias:

Tabla 1. Operaciones Unitarias de Planta Las Tórtolas.

Operaciones Unitarias	Flotación Colectiva Cu-Mo
	Sistema de Control Distribuido
	Sistema Impulsión Agua Recuperada Tranque (SAR)
	Instalaciones Comunes
	Tranque de Relaves
	Planta de Reactivos
	Espesamiento de Relaves
	Suministro Energía Eléctrica
	Planta de Moly
	Espesamiento y Filtrado Concentrado Cu

En la planta se realiza el proceso de flotación que se efectúa en dos etapas; una flotación colectiva donde se recupera en conjunto cobre y molibdeno, y una flotación selectiva para separar el cobre del molibdeno. Luego del proceso de flotación

(selectiva y colectiva) en las Plantas I y II y la correspondiente recuperación de concentrado de Cu y Mo de calidad comercial, se generan como desechos, los relaves mineros que son conducidos al Tranque.

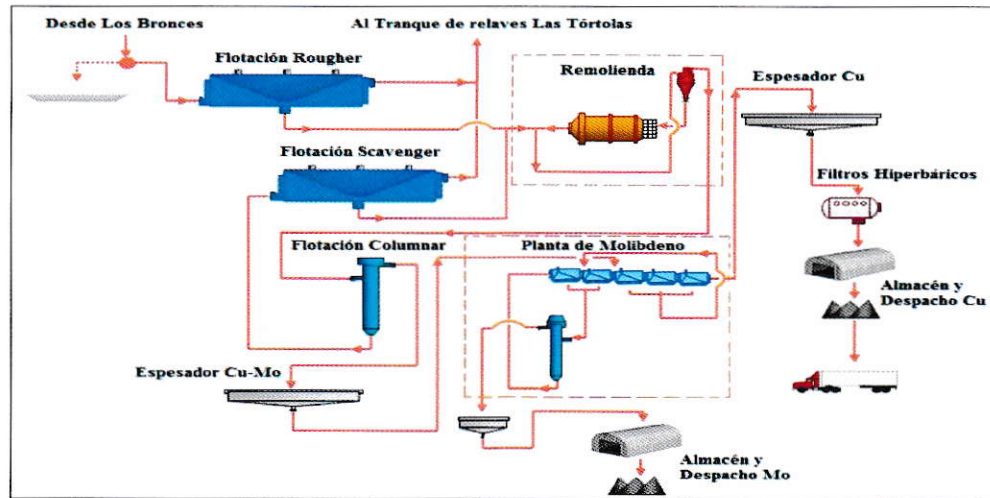


Figura 4. Diagrama Operacional de la planta de flotación Las Tórtolas.

1.5. El relave y su composición

Al igual que en cualquier proceso productivo para el desarrollo de un producto, los procesos mineros necesarios para la obtención del mineral también generan residuos o desechos, los cuales no son tratados dado que contienen porcentajes mínimos de mineral que se encuentran por debajo de la ley de corte.

Este residuo despreciable es denominado Relave o Cola y corresponde generalmente al 99% del total del material extraído. El porcentaje restante corresponde al mineral propiamente tal. La minería en Chile y el mundo se caracteriza por producir una alta cantidad de residuos proveniente de la explotación de los yacimientos. En el caso de Chile, la minería del Cobre posee leyes del orden del 1%, lo que por cada tonelada de roca explotada se producen 10 kg de cobre y 990 kg de desechos. Por ejemplo, la

producción de cobre del año 2007 fue de 5.557.000 toneladas, lo que permite estimar un total de 5.501.430 toneladas de relaves.

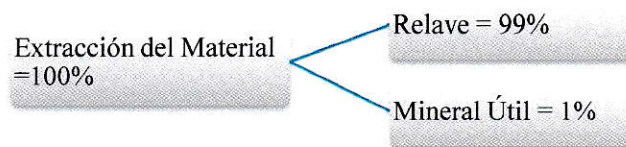


Figura 5. Esquema Extracción del Mineral.

Los relaves, según lo define la legislación nacional vigente (D.S. N°248 de 2007 del Ministerio de Minería) corresponden a una suspensión de sólidos en líquidos (pulpa), los que se generan y desechan en las plantas de concentración húmeda de especies minerales que han experimentado una o varias etapas en circuito de molienda fina. El vocablo se aplica también a la fracción sólida de la pulpa. Está compuesto de una mezcla de arena, limo y arcilla, en otras palabras, los relaves corresponden a un mineral finamente molido (<2mm) en solución acuosa, desde el cual no se ha podido extraer más metal a través del proceso de concentración por flotación. Usualmente, contienen entre un 10 y 20% de los minerales de interés económico que no han podido ser recuperados desde el mineral.

En cuanto a las características físicas, el tamaño de la partícula más abundante en un relave típico varía de los 2 μ m a los 2mm, equivalentes a arcilla y arena, respectivamente. Las características químicas más relevantes son un pH neutro a levemente alcalino (derivado de la flotación alcalina usada comúnmente en el país), una baja Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), una alta Conductividad Eléctrica (CE) o salinidad, un bajo contenido en Carbono Orgánico Total (COT) y altos contenidos de Cobre (Cu), Hierro (Fe), Calcio (Ca) y Sulfato (SO₄⁻²). En

términos macronutricionales, los relaves son, en general, muy pobres en Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) disponibles.

El contenido de metales/metaloideos de los relaves, tales como Cobre (Cu), Cadmio (Cd), Plomo (Pb) y Arsénico (As), imponen riesgos para la salud humana y el medio ambiente, a través de distintas vías de exposición. En el caso de los seres humanos y los animales, las vías posibles de exposición tienen relación con la ingesta del suelo o de agua contaminadas, el contacto directo con los suelos contaminados, la inhalación de los contaminantes adheridos al polvo del aire y la ingesta de alimentos (plantas y animales) que han acumulado contaminantes al estar expuestos al suelo o agua contaminados. En el caso de las plantas, las vías de exposición tienen relación con el aumento de metales/metaloideos en los suelos y/o en aguas naturales y de riego.

Es muy importante tener claridad en que la exposición de los seres vivos a los metales/metaloideos contenidos en los relaves no implica directa y necesariamente efectos y, por ende, riesgos ambientales. Sin duda, sin exposición no pueden existir riesgos. Sin embargo, para que la exposición sea efectiva en producir una respuesta negativa en los seres vivos, los metales/metaloideos deben encontrarse en una forma reactiva biológicamente (biodisponible) y esta fracción biodisponible debe encontrarse en una concentración que sea tóxica.

1.6. Disposición de Relaves

Las alternativas a utilizar para la deposición de un material de relaves, depende de:

- a) Características de los relaves que produce la planta (cantidad suficiente de material, tamaño arena)

- Masa de relaves con un gran contenido de agua (alto escurrimiento por gravedad).
 - Masa de relaves con un contenido de agua bajo (bajo escurrimiento por gravedad).
 - Partículas sólidas de un pequeño tamaño (equivalente a arcillas, requieren un largo periodo de sedimentación).
 - Partículas sólidas de gran tamaño (equivalente a arenas, sedimentación rápida).
- b) Costo de agua (la escasez de este bien en el sector justifica la inversión en equipos para optimizar su recuperación y planificación de las operaciones)
- c) Características del lugar de emplazamiento del depósito de relaves.

Para conseguir estructuras estables con los relaves, deben determinarse características similares a lo que se hace con los suelos (granulometría, densidad relativa, humedad, razón de vacíos, compactación, relaciones de fase, etc.). Estas determinaciones permiten también evaluar el cumplimiento de las disposiciones legales.

La normativa vigente que regula todo lo relacionado con los “Depósitos de Residuos Masivos Mineros”, desde el punto de vista de la seguridad es por medio del D.S. N° 132 (2004), "Reglamento de Seguridad Minera" y desde el punto de vista técnico mediante el D.S. N° 248 (2007), “Reglamento Para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Depósitos de Relaves”.

Dentro de la disposición de relaves existen diferentes y variadas formas de depositación de relaves, que dependiendo de diversos factores como son las cercanías al concentrador, capacidad de almacenamiento de relaves, topografía del

lugar, producción del yacimiento, se debe seleccionar la forma más apropiada para disponer estos relaves.

Los distintos tipos de depósitos de relave son los siguientes:

- Tranques de Relaves
- Embalses de Relaves
- Depósito de Relaves Espesados
- Depósito de Relaves Filtrados
- Depósito de Relaves en Pasta

1.7. Depósitos de Relaves

La alta producción de residuos trae consigo la problemática de su disposición, siendo la más utilizada en Chile los depósitos mediante Tranques de relaves, compuestos por muros prismáticos de contención contruidos con la fracción más gruesa del material, que clasifica como arena limosa, mientras que el más fino denominado lamas, que clasifica como limo, se deposita en la cubeta interior.

Siendo Chile un país sísmico, el principal problema que presentan estas presas es el fenómeno de licuación o licuefacción, en las zonas saturadas y de arenas sueltas. El problema de licuefacción en arenas de relave y su disposición en muros prismáticos de contención en Chile ha sido exhaustivamente estudiado, llegándose a la adopción obligatoria del método de construcción de aguas abajo. Con éste método se han logrado construir presas que en Chile superan los 150 m de altura, incluyendo el Tranque de relave Las Tórtolas.

1.8. Depósitos de relaves y medio ambiente

El manejo histórico inadecuado de los depósitos ha determinado que los relaves pueden ser dispersados al medio por distintas fuerzas físicas, tales como las lluvias intensas, los terremotos y los vientos. Adicionalmente, los relaves pueden reaccionar con el agua y el oxígeno que infiltra el material produciendo un drenaje ácido y solubilización de metales/metaloideos al medio, particularmente cuando su contenido de sulfuros de metal (ej. pirita, FeS_2) es elevado y las precipitaciones del lugar son altas. De esta forma, los riesgos ambientales asociados a los depósitos de relaves pueden clasificarse en las siguientes categorías:

- Riesgo sísmico.
- Riesgo hidrológico, ya sea por arrastre de los relaves, la generación de drenaje ácido y la solubilización de metales/metaloideos.
- Generación de polvo en suspensión en la atmósfera.
- Contaminación del suelo y aguas.
- Limitación de uso alternativo del terreno.
- Consumo de agua y fallas en el sistema de disposición.

El riesgo ambiental de la dispersión física de los relaves y de los drenajes ácidos depende, sin embargo, de diversos factores. El primero tiene relación con la falta de manejo, pero también de la cercanía de los depósitos de relaves a los centros poblados, a las zonas agrícolas, a las áreas silvestres de interés y a los cursos de agua presentes en la zona norte-centro del país. La condición de minería de pequeña y mediana escala ha determinado que las plantas procesadoras de minerales se ubiquen en lugares donde disponen recursos (agua, luz, mano de obra, alojamiento, etc.) y

accesos con relativa facilidad y de menor costo, como ocurren en las zonas urbanas y cercanas o los cauces de agua, aumentando el potencial de riesgo ambiental y para la salud humana. De esta forma, los depósitos de relaves abandonados pasaron a constituir focos potenciales de contaminación con metales del aire, los cursos de agua y los suelos aledaños, con los consecuentes problemas para la salud humana, los ecosistemas naturales y el sector agropecuario y, por ende, con importantes consecuencias socioeconómicas. Es importante destacar, sin embargo, que son escasos los estudios sistematizados y rigurosos realizados en la zona norte-centro de Chile, tendientes a evaluar cuantitativamente el grado e intensidad de dispersión de los relaves al medio y los efectos específicos de los relaves en sistemas silvestres, agropecuarios y dulceacuícolas.

Es evidente que, dada la importancia agrícola, ganadera, residencial y/o ecológica de los sectores próximos a los depósitos de relaves presentes en algunos sectores del país, y a lo crítico que resulta la contaminación del escaso recurso hídrico y de los suelos agrícolas de la zona, es fundamental que los depósitos de relaves actuales y futuros sean estabilizados en forma efectiva, ambientalmente sustentable y con una adecuada relación costo-beneficio, tanto en el corto como en el largo plazo.

Actualmente, como se menciona existen normativas que regulan la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los depósitos de relaves materializado en el D.S. N°248 de 2007 del Ministerio de Minería. Sin embargo, aún es limitada la disponibilidad de tecnologías de rehabilitación sistematizadas y validadas para el país, las que permitan a los propietarios de los desechos mineros lograr la estabilización adecuada y en el largo plazo de los depósitos de relaves, de

forma de dar cumplimiento a las actuales normativas de cierre de depósitos de relaves.

En el caso particular de los tranques de relaves, los impactos ambientales que pueden generarse cuando éstos no son estabilizados físico-químicamente en forma adecuada pueden ser de dos tipos: primarios y secundarios. Los primarios tienen relación directa con la dispersión de las arenas y lamas ricas en metales pesados a los suelos y cursos de agua cercanos, producto de la erosión eólica e hídrica, de la falla de los muros ante fuertes sismos y del arrastre del material por aluviones. Los secundarios se producen por transformaciones químicas del material al quedar expuesto al aire y las precipitaciones, particularmente cuando éstos son ricos en sulfuros de metales. En estos casos se produce drenaje ácido y lixiviación de metales pesados desde el tranque a los cursos de agua y suelos cercanos. La importancia de los impactos dependerá, sin duda, del tipo de ambiente donde se ubique la faena, como desierto, altiplano, trópico y zona mediterránea, entre otros, y de la cercanía a centros poblados, ecosistemas naturales y zonas silvoagropecuarias. Aunque la legislación ambiental chilena ha ayudado a mejorar el control y mitigación de algunos de los impactos ambientales producidos por los residuos mineros sólidos, la normativa actual es aún insuficiente, particularmente en el tema del cierre y abandono de faenas mineras.

1.9. Tranques de Relaves

La experiencia en Chile indica que el método más utilizado para la disposición final de los relaves mineros, principalmente en la mediana minería, es el tranque de arenas de relaves (Ver Fig. 6).

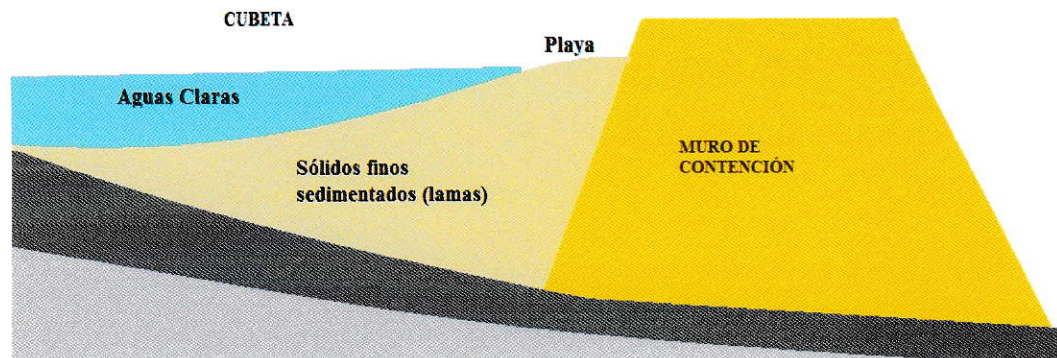


Figura 6. Esquema de la composición de un Tranque de Relaves.

Los tranques de relaves deben resistir diversos eventos naturales durante un tiempo prolongado, con lo que se generan riesgos para el medio ambiente y la salud pública en extensas zonas, a corto o largo plazo. Para minimizar y controlar los riesgos asociados a su construcción, se debe prestar especial atención a las etapas de diseño, construcción y operación, además de una planificación para el cierre o etapa de abandono. Entre otros problemas que se pueden producir destacan, el impacto visual, las alteraciones morfológicas y paisajísticas, la contaminación del agua, del aire y del suelo. Uno de los agentes que agravan los impactos anteriormente señalados es el fenómeno de la erosión, la que se manifiesta principalmente en forma hídrica y/o eólica, pudiendo generar grandes riesgos de inestabilidad mecánica si no se toman las medidas necesarias para minimizar sus efectos.

La contaminación del suelo, del agua y la erosión hídrica están muy estudiadas y son consideradas en todos los proyectos desde la etapa de diseño, en cambio, es sabido que tanto en nuestro país como a nivel mundial, el efecto producido por el viento en los tranques de arenas de relave habitualmente no es considerado en las etapas de

diseño, operación y cierre. Este problema puede ser significativo, no tan sólo por los efectos contaminantes que se generan al arrastrar los sedimentos del depósito, sino que también por la erosión que se origina en la superficie del talud del tranque, lo que produce una pérdida de revancha, variación de la geometría proyectada y disminución de las propiedades resistentes del talud, generando mayores riesgos de inestabilidad. Hoy en día, la operación de los tranques de relave considera la protección del ambiente, pero no se puede negar la existencia de impactos y daños generados durante la etapa y posterior al abandono si no se toman las medidas preventivas necesarias.

1.9.1. Disposición “Muro de Contención” y Métodos de Construcción.

La creación del muro de contención se basa principalmente en un tratamiento previo del relave en donde éste se separa en fracciones gruesas (arenas de relave) o en fracciones finas (lamas) mediante la utilización de “Hidrociclones”. Posteriormente las primeras fracciones se utilizan para la construcción, en la parte inferior de una cuenca, del muro de contención y las segundas son descargadas al interior del Tranque formado. En la cubeta los sólidos finos (lamas) sedimentan y en la superficie se forma una laguna de aguas claras. Una vez que el depósito se encuentra próximo a llenarse, se procede al levante del muro, desplazando los Hidrociclones a una mayor elevación en la dirección correspondiente y comenzando una nueva etapa de descarga de arenas, y peralte del muro; se continúa sucesivamente la construcción en la forma indicada (ver Fig. 7).

- Aguas arriba; se inicia el levante del muro hacia aguas arriba, es decir, nuevamente sobre las arenas.

- Aguas abajo; consiste en depositar las arenas de manera que el coronamiento del muro se mueva hacia afuera a medida que crece el Tranque.
- Eje central o mixto; el levante del muro se realiza en forma vertical sobre el coronamiento del muro resistente.

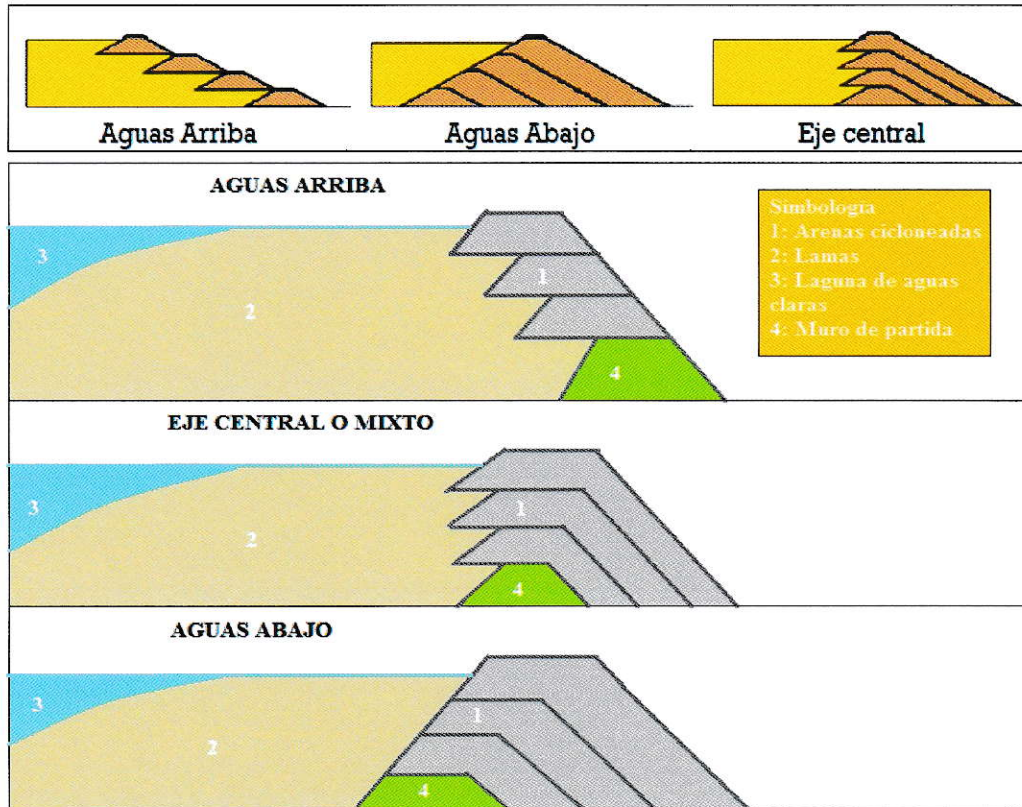


Figura 7. Métodos Constructivos del muro de Arenas de Tranque de Relaves.

Cabe destacar que de los distintos métodos constructivos el método más utilizado es el de aguas abajo, este método requiere disponer de un gran volumen de arenas y permite lograr muros resistentes más estables del punto de vista de la resistencia sísmica, llegando a alturas de 150 metros. El método de eje central requiere disponer de un volumen de arenas intermedio entre los 2 métodos (aguas arriba y aguas abajo), y permite lograr muros suficientemente estables. Con el método de aguas

arriba, en la práctica, se pueden alcanzar alturas de hasta 25 metros. Si bien este método es el que requiere un menor volumen de material arenoso, por lo que ha sido utilizado en la pequeña minería para construir numerosos tranques, es el que produce el tipo de muro menos resistente frente a oscilaciones sísmicas, es por ello que en la actualidad en Chile, no está contemplado aprobar este tipo de proyecto de Tranques de relaves en la legislación vigente.

Estos métodos constructivos del muro de arenas de los Tranques de relaves mencionados anteriormente son sobradamente conocidos en Chile, siendo los métodos de aguas abajo y eje central los que contempla hoy nuestra legislación en los proyectos de Tranques de Relaves que se presentan al Servicio Nacional de Geología (SERNAGEOMIN) para su aprobación.

1.9.2. Disposición “Tratamiento equivalente a un Suelo Húmedo”

Este método a diferencia de los anteriores no requiere de un muro o dique para su contención, sólo basta un sector llano o levemente inclinado en dónde dejar el relave. Lo anterior se debe a tratamientos previos que se le realiza al relave, el cual es sometido a una disminución de volumen de agua según la pendiente del lugar en dónde se disponga y a la elaboración de una mezcla más consistente y estable que no permite la separación de sus componentes. La escasa diferencia en la disminución de agua entre los tres sistemas, permite la utilización de un mismo depósito.

Una pulpa de relaves con suficiente agua se comportará como una suspensión acuosa, cuya viscosidad aumenta si disminuye el agua, hasta que, para contenido de

agua suficientemente bajos se comportará como un lodo espeso y eventualmente, como un suelo húmedo o lodo (slurry).

Experimentalmente podemos medir con el parámetro S/A, donde S= sólido y A=agua:

- Si la razón S:A es menor que 50%, la pulpa de relave se comporta como suspensión acuosa, y escurrirá incluso con pendientes menores a 2% y se produce segregación de las partículas con la distancia al punto de descarga.
- Si la razón S:A es mayor o igual que 55%, la pulpa de relave comienza a tener un comportamiento de un lodo viscoso; disminuye fuertemente la segregación de partículas y se necesitará pendientes mayores al 2% para escurrir.

La siguiente tabla nos indica la pendiente límite que admite una pulpa de relave para distintas concentraciones de sólidos en peso (pendientes mayores producirán su escurrimiento).

Tabla 2. Pendiente límite de una pulpa de relave para distintas concentraciones de sólido en peso.

Pendiente Límite %	Porcentaje de sólidos en masa %
<2	<50
2-3	55-66
3-5	60-63
4-6	63-65
>6	>65

1.10. Relave Integral

El material de Relave Integral es el obtenido de las faenas de chancado y molienda del proceso minero. Según la clasificación USCS (Sistema Unificado de

Clasificación de Suelos), el material clasifica como limo arenoso, con contenido aproximado de limos y arenas en proporción.

Comúnmente se le agrega agua al relave integral para poder transportarlo en canaleta o relaveductos hasta los depósitos de relaves, así el material alcanza concentraciones de sólidos en peso al 50%.

Dependiendo de la concentración en peso de sólidos del relave integral lograda mediante la recuperación de agua, se tienen distintas denominaciones tales como relaves espesados, en pasta o filtrados.

1.11. Relaves Espesados

Con el motivo de reducir el consumo de agua, escasa en zonas como el Norte Grande de Chile, y las infiltraciones de agua contaminada provenientes del material de relave en las napas subterráneas, hace unos 40 años atrás el Canadiense Eli Robinsky propuso un método alternativo denominado Thickened Tailings Disposal TTD (Disposición de Relaves Espesados), el que ha sido implementado en diversos procesos mineros en el mundo. El método consiste en la disposición del relave en pendiente o loma auto-soportante para minimizar o eliminar el requerimiento de muros de confinamiento y de lagunas de decantación de los tranques convencionales.

Corresponde al relave integral, el cual es sometido a un proceso de sedimentación mediante espesadores en donde se quita gran parte del agua que contiene, quedando aproximadamente con una concentración en peso de sólidos de 70%. La pendiente de depositación natural varía aproximadamente entre 3-6%, dependiendo de la concentración en peso de sólidos ocupada.

Para lograr esto, el relave pasa por un proceso de espesamiento en donde es removida una gran cantidad de agua, llegando a una concentración de sólidos en peso de 65-70%, el cual es bombardeado hasta una torre desde donde se va depositando, formando un “cono de relaves”.

El procedimiento se basa en la mayor viscosidad que alcanza la pulpa de relave al aumentar la concentración de sólidos. El autor propone una curva en que relaciona el ángulo de reposo o pendiente de depositación del relave con el contenido de sólidos de la pulpa.

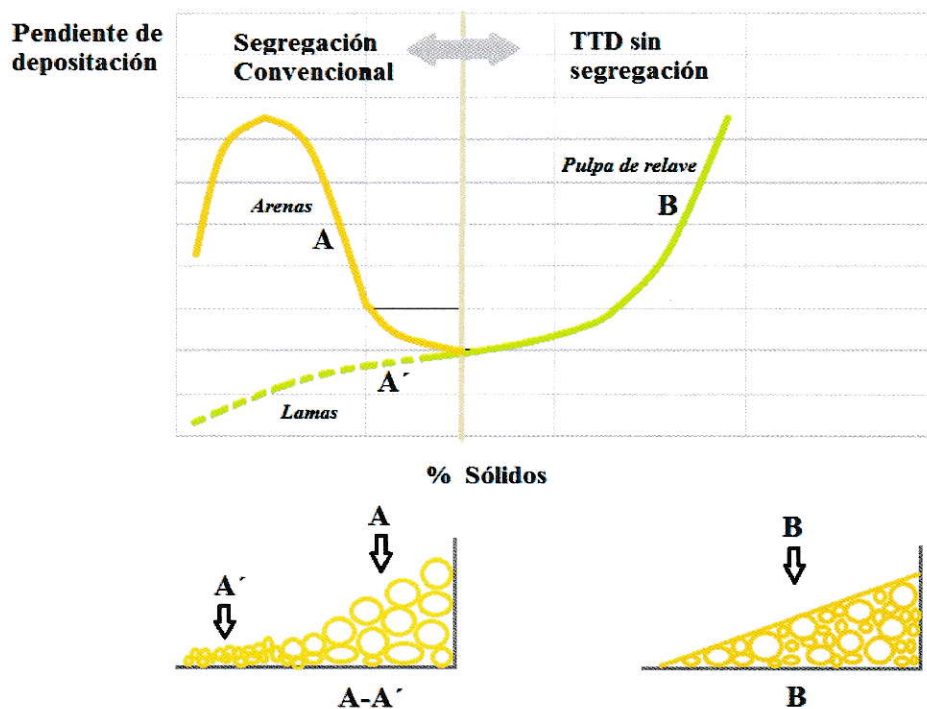


Figura 8. Curva de Robinsky, relación entre la pendiente de depositación y el porcentaje de sólidos de la pulpa.

Por ejemplo, para concentración del orden de 53% en peso, la pendiente de reposo es del 2% y ésta aumenta hasta un 6% si la concentración sube a 65%. De esta manera pueden disponerse los relaves en forma de un cono cuya pendiente será la que

corresponde a la respectiva concentración de sólidos. Si se trata, por ejemplo, de depositar relaves en un valle plano desde la ladera que limita dicho valle, se puede iniciar el depósito desde pequeña altura con una pulpa relativamente diluida para luego elevar el punto de descarga simultáneamente con un aumento de la concentración a fin de disponer para las capas siguientes de una pendiente más pronunciada. El punto de descarga puede luego ser desplazado lateralmente con el objeto de formar un depósito de base ovoidal. En las Figuras 9, 10 y 11 se ven los diferentes métodos de disposición, en la Fig. 12 el esquema de disposición y en la Fig. 13 las diferencias entre el relave convencional y espesado.



Figura 9. Método de desplazamiento Discontinuo de relaves espesados.



Figura 10. Depósito domo por sectores de relaves espesados.



Figura 11. Método de desplazamiento Continuo de relaves espesados.

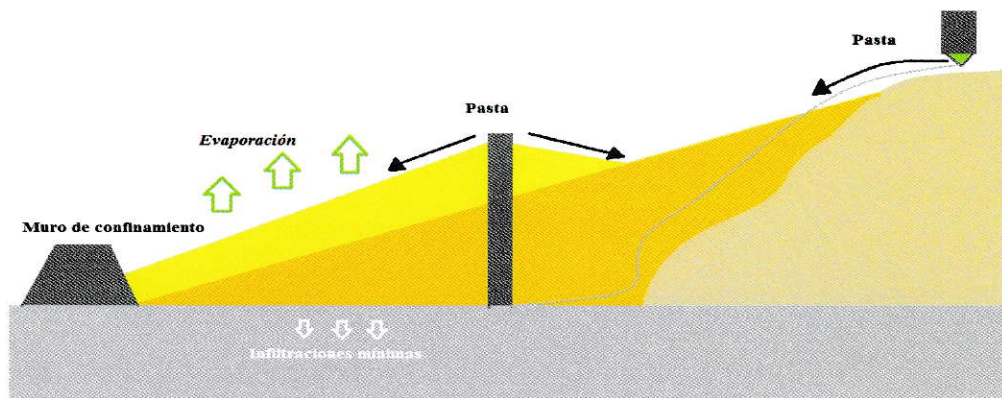


Figura 12. Esquema de disposición de Relaves Espesados.

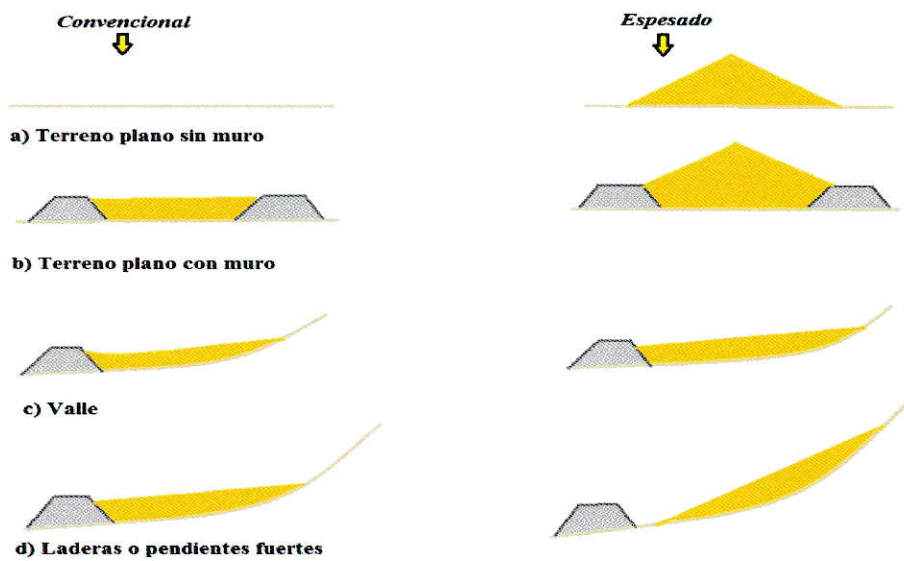


Figura 13. Depósitos de Relave Convencional y Espesado en Distintas Topografías.

1.11.1. Ventajas ambientales y operacionales del Método TTD

A las características de estabilidad que adquiere el relave por depositarse bajo el método TTD, se suman otros efectos favorables, principalmente desde el punto de vista ambiental.

- Infiltraciones

Un beneficio adicional de la succión capilar, es que la columna de agua en el relave descargado, se evacúa de forma ascendente, resultando que cuando el depósito está operando en condiciones regulares (Concentración de sólidos del diseño y área de evaporación suficiente) las infiltraciones son nulas. Si se suma que las capas profundas van quedando con una densidad, al menos, del límite de contracción, su permeabilidad es muy baja y por lo tanto en eventos de lluvia, que suele ser de corta duración (algunas horas) no logran que las aguas en el relave alcancen a infiltrar, ya que se restablece rápidamente la evaporación del agua y por tanto la succión.

- Recuperación de Agua

En los depósitos TTD la recuperación de agua se realiza en la etapa de espesado, y por tanto es independiente de la estacionalidad del año, siendo una variable controlada. No hay recuperación de agua desde el depósito, por lo tanto la operación no debe considerar manejo de laguna, balsas de bombeo o torres de evacuación de agua de proceso. Los rangos habituales de espesado de los relaves permiten recuperaciones de agua globales de sobre un 80%, lo que es significativamente mayor que un depósito convencional.

- Transporte hidráulico

Las características reológicas de depositación TTD, están asociadas a transportes hidráulicos de las pulpas menos complicados que los casos de transporte de pastas muy espesas, que deben ser transportadas con altos consumos de energía.

- Erosión Eólica

También los relaves que alcanzan su límite de contracción por evaporación y que tienen una distribución granulométrica homogénea, generan superficies muy consistentes, de alta resistencia a la acción eólica, lo que evita la polución por polvo.

- Planes de cierre

El crecimiento de un depósito TTD permite asegurar que las capas de relaves queden dispuestas en baja pendiente con una densidad equivalente al límite de contracción, prácticamente el mismo día de depositado el relave. La ausencia de laguna y de obras operacionales en el depósito, a excepción de muros de confinamiento en algunos casos, permite realizar planes de cierre inmediatos y de bajo costo comparativamente con depósitos o tranques convencionales.

1.12. Relaves en Pasta

El relave en pasta corresponde al relave integral, al cual se le quita una gran cantidad de agua, diferenciándose del relave espesado por la concentración en peso de sólidos final que corresponde aproximadamente a un 75%. La pendiente natural de este depósito varía entre un 10 a un 15%.

Corresponden a una mezcla de agua con sólido, que contiene abundante partículas finas y un bajo contenido de agua, de modo que esta mezcla tenga una consistencia espesa, similar a una pulpa de alta densidad. Presenta una situación intermedia entre el relave espesado y el relave filtrado.

Una buena pasta de relaves requiere tener al menos un 15% de concentración en peso de partículas de tamaño menor a 20 micrones.. Su depositación se efectúa en forma similar al relave filtrado, sin necesidad de compactación, poseyendo una consistencia coloidal.

La consistencia alcanzada permite que una pasta permanezca estable aun cuando esté varias horas sin moverse. La pasta puede formarse a partir de una gran variabilidad de componentes como cuarzo, feldespatos, arcillas, micas y sales. Es posible producir materiales con la consistencia de pasta a partir de un amplio rango de concentración de sólidos en peso y sobre la base de la variación de la distribución de tamaño de las partículas. Es decir, la producción de pasta es específica para cada tipo de material.

Cuando se dispone pasta de relaves en superficie, una muy pequeña fracción de agua podrá drenar o infiltrarse, ya que la mayor parte de la humedad es retenida en la pasta debido a la tensión superficial de la matriz de suelo fino.

Para faenas de pequeña escala, la pasta puede ser transportada en camiones desde las instalaciones de operación y descargadas en el lugar de disposición final. Una vez depositada, se deja secar y se puede acopiar. Esta forma de acumular, permite minimizar la superficie de suelo cubierto con relaves, realizar un cierre progresivo y al cese de operaciones, el depósito puede ser dejado sin requerir medidas adicionales de cierre.

Para faenas de mayor tamaño, por economía de escala para el manejo de materiales, el sistema considera el uso de bombas o cintas transportadoras hasta un repartidor que realiza la disposición final. Cabe destacar que debido a su alta densidad, las

pastas son transportadas mediante el uso de bombas de desplazamiento positivo. Principalmente, los depósitos de relaves en pasta poseen las mismas ventajas de la disposición TTD. En Chile, sólo cinco proyectos de depósitos de relaves en pasta se encuentran en distintas etapas de ejecución (Cabildo, Delta, Esperanza, Minera el Toqui y COEMIN en la Región de Atacama).

1.13. Relaves Filtrados

El relave filtrado corresponde al relave integral al cual se le quita una gran cantidad de agua por proceso de filtración, mediante equipos especiales de filtro, diferenciándose del relave espesado y en pasta por la concentración en peso de sólidos final que es menor al 80%.

El sistema utiliza equipos similares a los que se emplean para filtrar los concentrados, como son los filtros de prensa o de vacío. Una vez filtrado, el relave es transportado al lugar de depósito mediante cintas transportadoras o bien mediante equipos de movimiento de tierra y/o camiones.

En el primer caso se logra un domo de material similar al método de Robinsky, mientras que en el segundo caso se utiliza el equipo de movimiento de tierras para ir construyendo módulos de material compactado, los cuales permiten conformar un depósito aterrazado de gran volumen.

Es importante señalar que en este método, aunque el contenido de humedad que se logra (20% a 30%) permite su manejo con equipos de movimiento de tierra, es suficientemente alto como para tener un relleno prácticamente saturado, por lo que es posible que se produzcan infiltraciones importantes de las aguas contenidas en estos

relaves si el suelo de fundación es relativamente permeable. También es necesario señalar que la presencia de algunas arcillas, yeso, etc. en los materiales de relaves pueden reducir significativamente la eficiencia de filtrado.

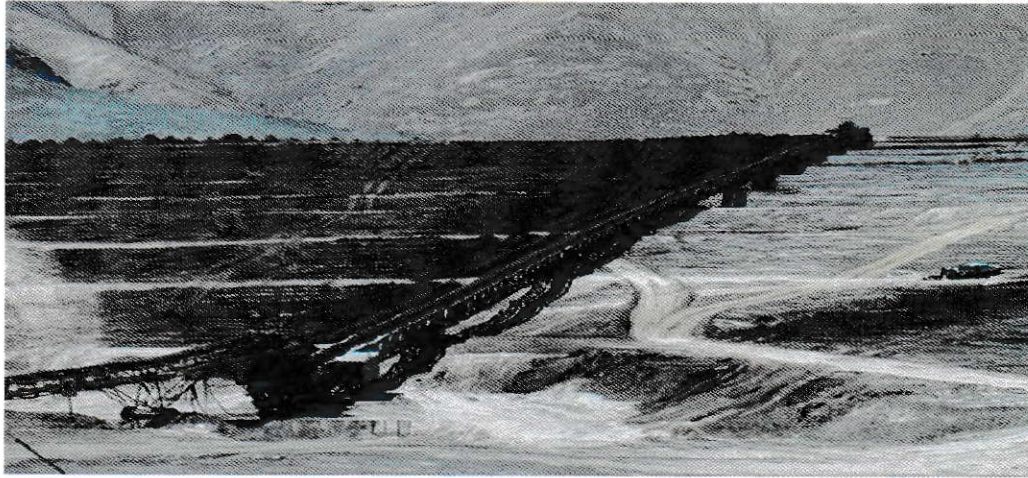


Figura 14. Deposición de Relaves Filtrados.

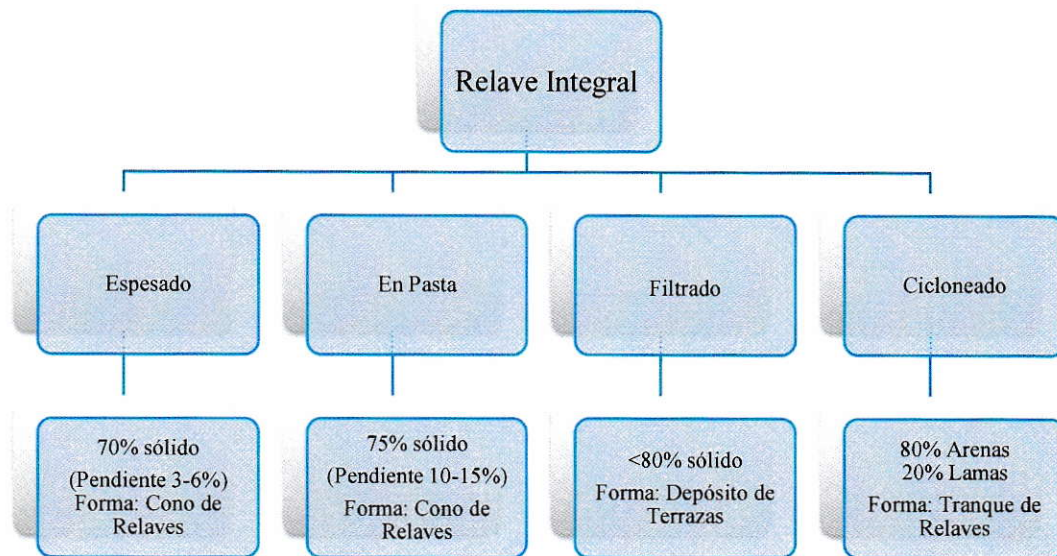


Figura 15. Tipos de relaves junto a sus características de deposición.

1.14. Antecedentes Generales del Tranque de relave Las Tórtolas

El Tranque de relave Las Tórtolas de Anglo American Sur se ubica en el Valle Central de Chile, de la comuna de Colina de la provincia de Chacabuco (Región Metropolitana), a los 75°45' de Longitud Oeste y 33°08' de Latitud Sur.

El tranque Las Tórtolas opera desde el año 1992, contando con las siguientes aprobaciones:

- SERNAGEOMIN, mediante Resolución N°733-06 de Agosto de 1985
- DGA, mediante Resoluciones N°100 del 22/03/88 y N°544 del 21/12/91
- MOP, mediante Decreto Supremo N°67 del 04/03/92

Este tranque recibe los relaves generados como excedente de la producción de la mina Los Bronces, conformándose mediante el levantamiento de tres muros de arena de relaves, obtenida mediante clasificación, denominados Muro Principal, Este y Oeste. Los tres se construyen con el método de aguas abajo, considerando que las arenas se descargan hidráulicamente desde el coronamiento formando un talud de aguas abajo con pendiente de 3:1 (H:V), modificada el año 2007. Cada muro está dotado de un muro de partida, sistema de drenaje basal, sistema de control de filtraciones e instrumentación geotécnica.

El Tranque las Tórtolas está proyectado y autorizado, mediante los decretos mencionados anteriormente, para una capacidad de 1.000.000 t, lo que implica alcanzar en el Muro Principal una cota final de 800 m.s.n.m y una altura máxima de 193 m.



Figura 16. Imagen del Tranque de relave Las Tórtolas.

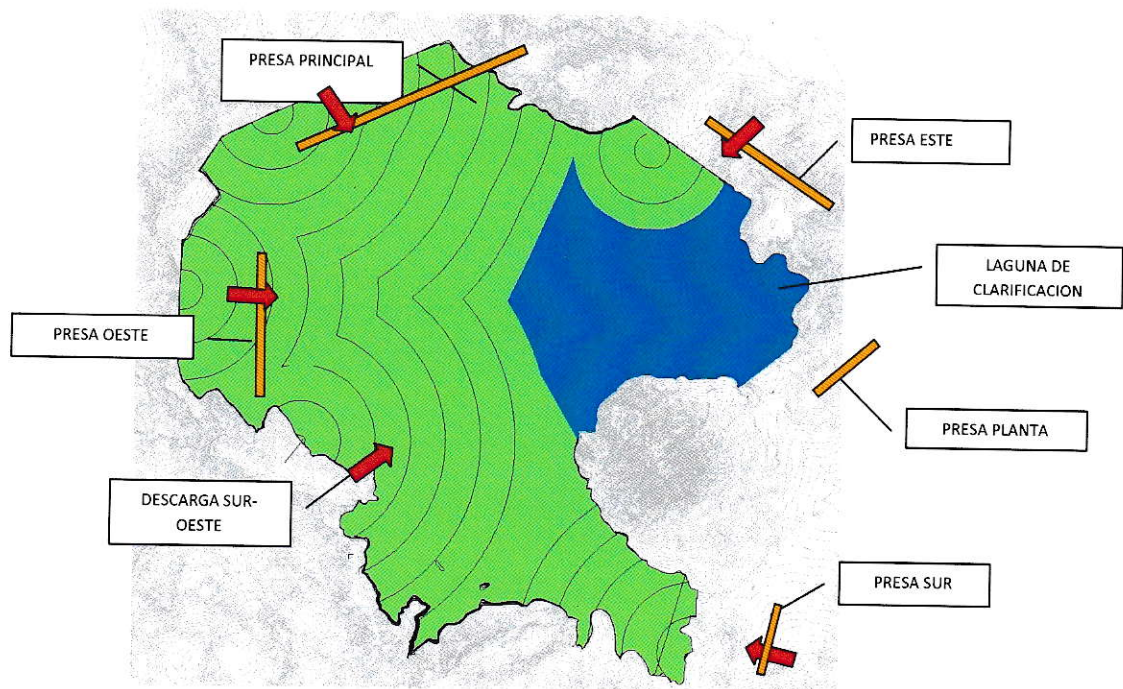


Fig. 17. Esquema General Depósito Las Tórtolas

1.14.1. Criterios de diseño

Generales

- Crecimiento de muro: Aguas Abajo, Sistema Spigot (Deposición desde el coronamiento)
- Tipo de construcción: Deposición Hidráulica
- Compactación arenas: 95% del Próctor Estándar
- En cuanto al manejo de la cubeta, se considera mantener el sistema actual de disposición de lamas y relaves desde el muro, en modo de mantener alejada la laguna de éste.

Diseño del Muro Principal

- Cota final de coronamiento del muro: 800 m.s.n.m
- Altura máxima del muro: 193m
- Taludes muro de arena promedio: 3:1 (H:V) Aguas Abajo
: 2:1 (H:V) Aguas Arriba
- Revancha mínima (Relave/Lamas): 3m
- Ancho de coronamiento: 15m
- Material construcción muro de arena: Arenas Cicloneadas

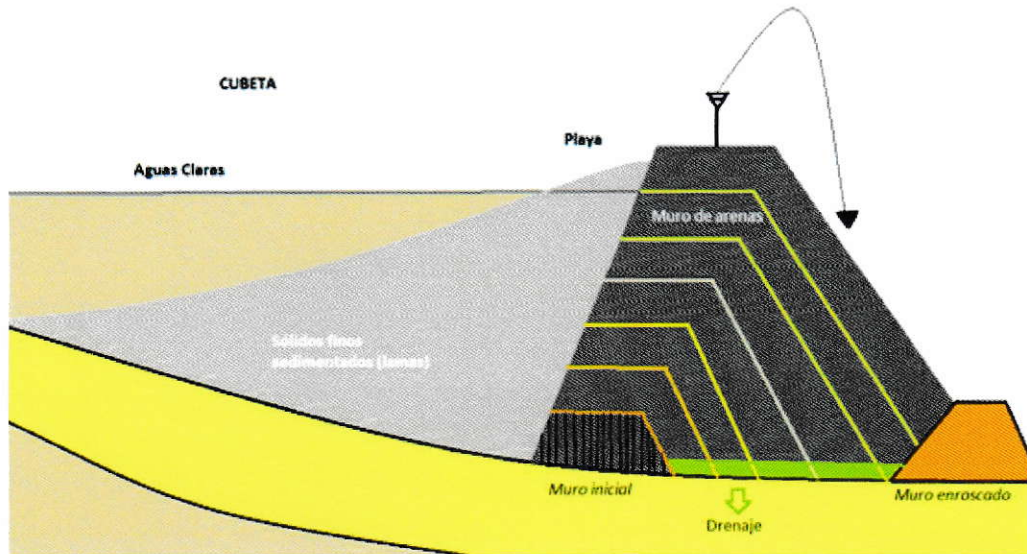


Figura 18. Método Constructivo Aguas Abajo del Muro Principal de arenas del Tranque de Relaves Las Tórtolas.

1.14.2. El entorno y territorial, climatológico y meteorológico de la zona del Tranque de relave Las Tórtolas.

1.14.2.1. Entorno Territorial

En la Fig. 21 se muestra el Tranque y su entorno inmediato. Se observa abundancia de sitios agrícolas en todo el entorno del Tranque. Para este estudio son de particular relevancia los que se ubican dentro del rango de algunos kilómetros desde el muro principal y hacia el N, NE y NW del Tranque, que son los más afectados por los vientos más frecuentes. Las localidades situadas hacia el S, SW y SE del Tranque no serían afectadas de manera importante por las emisiones del tranque, ya que la frecuencia de vientos hacia esas direcciones, y su velocidad son muy bajas durante todo el año.

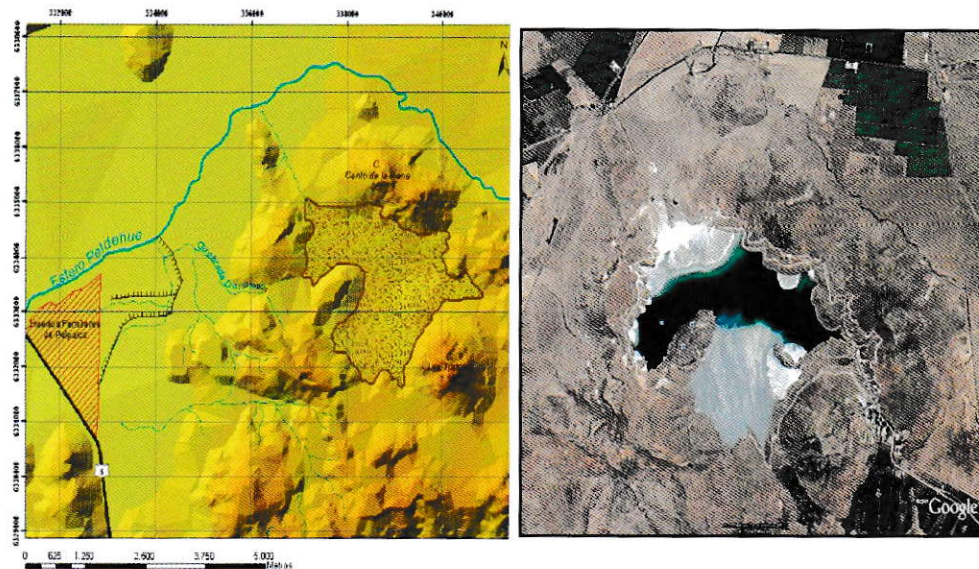


Figura 19. Entorno territorial del Tranque de relave Las Tórtolas.

1.14.2.2. El entorno climatológico y meteorológico.

Dada la cercanía con la Región Metropolitana, la climatología de la zona del tranque es similar a la de dicha región. Las características principales son las tasas de precipitación moderadas, del orden de 300 milímetros anuales, con vientos cuya dirección está gobernada por la presencia del Anticiclón del Pacífico y la topografía local. Los vientos más frecuentemente observados son los del SSE, en los meses cálidos y todo un rango de direcciones, desde el N al SSE durante los meses fríos. Durante todo el año también hay una contribución de relativa importancia de vientos desde el W.

Los datos meteorológicos utilizados en este estudio fueron generados en la actual estación meteorológica Las Tórtolas, la cual se ubica en la cercanía de la laguna del tranque. La ubicación de ella está dada por las siguientes coordenadas

Coordenada UTM Este: 340740 metros

Coordenada UTM Norte: 6333414 metros

Altitud: 715 m.s.n.m.

1.14.3. Sistema de Control de Infiltraciones

El muro principal está dotado de un sistema de control de filtraciones compuesto por drenes basales, que captan los excedentes de agua de construcción (drenajes) y los conducen hasta la piscina de recolección de filtraciones ubicada aguas abajo del muro para su posterior recirculación. También se cuenta con un sistema de control de filtraciones subterráneas, constituido por una batería de pozos de bombeo (sentina) ubicada aguas abajo del pie final del muro.

El agua infiltrada a través del muro se utiliza para dilución y lavado en la planta de ciclones del tranque y como agua de sello para las bombas de impulsión del sistema de clasificación, transporte y deposición de relaves. Además se utiliza para operar el sistema de aspersores del muro principal.

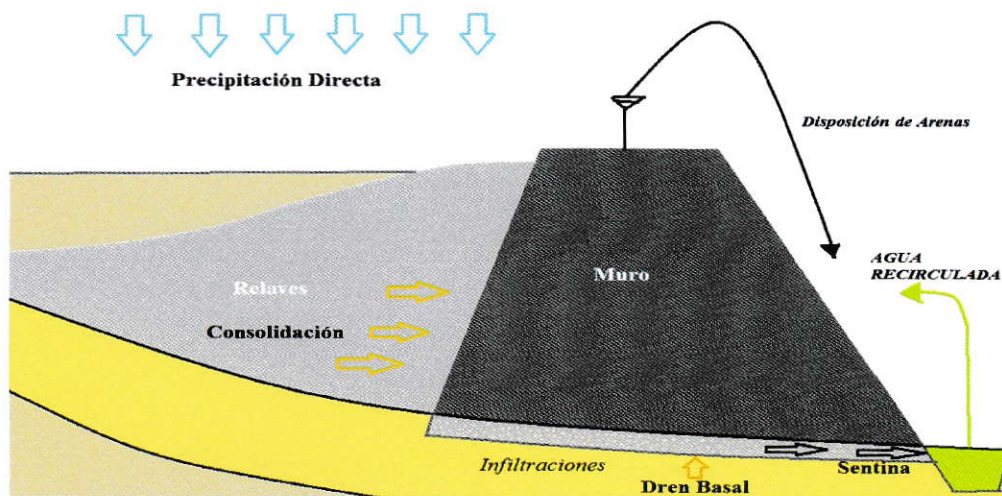


Figura 20. Diagrama de disposición de las arenas y agua recolectada del muro principal Las Tórtolas.

1.14.4. Sistema de deposición y compactación

El sistema de deposición se realiza vía tuberías instaladas en el coronamiento del muro, donde se depositan las arenas cicloneadas (aguas abajo), proveniente de los

Hidrociclones. Luego de depositar se procede a la compactación realizada por camiones Bulldozer.



Figura 21. Fotografías de la depositación y compactación de arenas, respectivamente.

1.14.5. Sistema de Riego

Producto del viento que se desplaza por sobre la cubeta hacia el muro, se genera material en suspensión el que debe ser controlado según requerimientos formales de las autoridades sanitarias. Como medida de mitigación, se han dispuesto un total de 22 aspersores a lo largo del muro principal para mantener húmeda la superficie y así evitar el traslado de la partícula por el aire. Éstos funcionan durante 7 horas al día en verano y 1 hora al día en invierno. Trabajan en pares, durante 1 minuto y en ciclos de 5 minutos, cubriendo los 360° alrededor del mismo y aproximadamente 30 metros de diámetro.



Figura 22. Fotografías del sistema de riego.

1.15. Erosión Eólica

En un número importante de tranques de relave en Chile, la ubicación geográfica, las condiciones topográficas, el clima, las características geométricas del depósito, especialmente su altura, las características de los vientos predominantes, como velocidad e intensidad, entre otros aspectos, generan el arrastre de material particulado y erosión en el muro y/o en la cubeta.

La presencia de vientos agresivos, pueden afectar la estabilidad del talud, debido a que la erosión que se origina en su superficie produce una pérdida de revancha, variación de la geometría proyectada y disminución de las propiedades resistentes del mismo, generando mayores riesgos de inestabilidad del tranque; también al ambiente se puede ver impactado negativamente, más aún cuando en las cercanías del depósito afectado existen zonas habitadas o áreas donde se desarrollan actividades productivas, del ámbito minero, industrial o agrícola.

La erosión eólica en el muro del tranque resulta ser de mayor importancia por los riesgos de inestabilidad mecánica que genera. Por tanto, se deben tomar las medidas necesarias para minimizar efectos como la pérdida de revancha producida en el talud, la variación de la geometría proyectada y la disminución de las propiedades resistentes del material que conforma el muro.

En tranques de relave se puede decir que el efecto producido por el viento, es un proceso complejo controlado por diversos factores climáticos y ambientales, que ocasiona movimiento de partículas de diferentes tamaños. Dos variables fundamentales del fenómeno para estos depósitos son el suelo y la altura, pues a medida que el tranque va creciendo en la etapa de operación, la altura de muro resistente aumenta al igual que la acción del viento sobre éste, llegando a un instante en que se generan problemas de enorme importancia enfocados en 3 ámbitos: estabilidad mecánica, ambientales y de operación. La erosión eólica se produce dependiendo de las condiciones que presente el viento como agente erosivo, de las características del suelo y susceptibilidad de éste a erosionarse, siendo también un factor importante la vegetación existente. Actualmente a nivel mundial, el tema de la erosión eólica en tranques de arenas de relave se enfrenta principalmente durante la etapa de operación, una vez que se han hecho presente los problemas erosivos, tomándose medidas orientadas a la mitigación del problema a través de sistemas estabilizadores generalmente temporales, los cuales pueden tener un costo significativo.

1.15.1. Alternativas de mitigación de la erosión eólica en Tranques de relave mediante la estabilización.

El proceso mediante el cual se mejora el suelo para alcanzar los requisitos establecidos, es conocido como estabilización, permitiendo una modificación del propio material. Es posible efectuar este procedimiento mediante el empleo de elementos químicos (emulsiones asfálticas, cemento, cloruro de sodio y otros), medios mecánicos (compactación por medio de la aplicación de una gran energía, enrocados, protección superficial de taludes, capas de suelo y otros), o también por medios naturales (estabilización vegetativa y otros). Las propiedades a mejorar con la estabilización de suelo generalmente son, estabilidad volumétrica, resistencia, permeabilidad, compresibilidad y durabilidad.

La resistencia es una de las propiedades que está directamente relacionada con la erosión eólica. Se puede decir que aumentando la cohesión se eleva la resistencia al corte de las partículas y disminuye la posibilidad de ser erosionadas por la gravedad, empuje y succión que produce el viento. El tipo de estabilización utilizado va a depender de la etapa en que se encuentre el Tranque de relave, es decir, en operación o abandono, debido a que las características de las propiedades requeridas de resistencia, permeabilidad, y durabilidad, entre otras, cambian (Palma, Juan. y col, 2007).

1.15.2. Estabilización mecánica.

Es un tratamiento mediante el cual se emplaza una barrera que resiste la acción del viento e impide el arrastre del relave en base a adiciones de otros materiales, o recubrimientos protectores. En los Tranques de relaves la aplicación de

estabilizadores mecánicos están orientados principalmente a dar una solución a largo plazo, y en la etapa de abandono. Entre las soluciones más conocidas están:

- Cubierta de suelo o combinación de suelos con otros materiales.
- Enrocados
- Geosintéticos

1.15.3. Estabilización química.

Se refiere principalmente a la utilización de sustancias químicas que se mezclan íntima y homogéneamente con el relave, modificando su estructura y resistencia a la acción del viento. En los Tranques de relaves las aplicaciones de estabilizadores químicos están orientadas principalmente a dar una solución de corto plazo, sin embargo, esta aplicación combinada con otra solución, se podría considerar una etapa inicial de una estabilización a largo plazo. Entre las alternativas más conocidas se pueden mencionar:

- Estabilización con materiales bituminosos.
- Estabilización con cloruro de sodio.
- Estabilización con cloruro de calcio.
- Estabilización con cloruro de magnesio.

1.15.4. Estabilización microbiana de suelos.

Se refiere principalmente a la utilización de microorganismos o productos generados por acción microbiana que se mezclan íntima y homogéneamente con el suelo, modificando su estructura y resistencia al viento. En los Tranques de relaves las aplicaciones de estabilizadores microbianos están orientadas principalmente a dar una solución a corto plazo, al igual que la estabilización química, combinada con otra solución, se podría considerar una etapa inicial de una estabilización a largo plazo.

La cementación provocada por microorganismos o productos generados por microorganismos puede formar un tipo de "pegamento biológico" que permite una forma de cementación que incrementa la resistencia de corte y, por ende, protege de la erosión eólica, jugando un rol similar al de las raíces de las plantas. De acuerdo a los resultados obtenidos mediante el empleo de bacterias, principalmente a nivel experimental, es posible la aplicación de estas técnicas en variadas actuaciones geotécnicas.

1.15.5. Fitoestabilización de suelos.

La finalidad principal es cubrir y proteger la superficie de los terrenos amenazados o afectados por la acción del viento, utilizando plantas, semillas, o trozos de plantas. Se protege la superficie del suelo en contra el impacto de lluvias intensas, granizo, corrientes de agua, hielo y otras formas de erosión.

1.16. Material particulado

El material particulado constituye en una mezcla compleja de sustancias orgánicas e inorgánicas que presentan una composición física y química variable, dependiendo de su procedencia. Se define como un conjunto de partículas sólidas y/o líquidas (a excepción del agua pura) presentes en suspensión en la atmósfera (Mészáros, 1999). Las características físicas de las partículas influyen en su transporte, tiempo de permanencia y la posibilidad de depositación, tanto en el medio ambiente como a través del sistema respiratorio, y su composición química interviene directamente sobre los efectos en la salud humana.

De acuerdo con el diámetro de las partículas y a su importancia en la contaminación del aire, el material particulado (PM) se puede clasificar de la siguiente forma:

- Partículas finas: corresponde al material particulado con un diámetro aerodinámico menor o igual que $2,5 \mu\text{m}$ y son denominadas como $\text{PM}_{2,5}$.
- Partículas gruesas: incluye al material particulado con un diámetro aerodinámico entre $2,5 \mu\text{m}$ y $10 \mu\text{m}$. El material particulado con un diámetro aerodinámico inferior a $10 \mu\text{m}$ es denominado PM_{10} y también se utiliza como término integrador del total de partículas finas y gruesas. Se producen principalmente por desintegración de partículas todavía mayores a través de procesos mecánicos.
- Partículas Suspensas Totales (PTS): se utiliza para denominar el total de las partículas que se encuentran en el aire y usualmente representa todas las partículas con diámetro aerodinámico hasta $100 \mu\text{m}$. Generalmente las partículas con diámetros superiores a este no permanecen en el aire por largos periodos de tiempo, sino que sedimentan debido a las fuerzas gravitatorias.
- Partículas Sedimentables (MPS): se entiende como todo material particulado, independiente de su tamaño, que sedimenta. Generalmente es captado sobre una unidad de superficie y se mide en una unidad de tiempo.
- Partículas ultrafinas: se utiliza para denominar partículas de menores a un diámetro dinámico de $0,1 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{0,1}$), término usualmente utilizado en medicina. Forman parte de la fracción fina ($\text{PM}_{2,5}$). Se forman por nucleación, que es la etapa inicial en la que el gas se convierte en partícula. Dichas partículas pueden crecer hasta alcanzar un tamaño de $1 \mu\text{m}$, ya sea por condensación, cuando otros gases se condensan en partículas, o por coagulación, cuando dos o más partículas se combinan para formar una mayor.

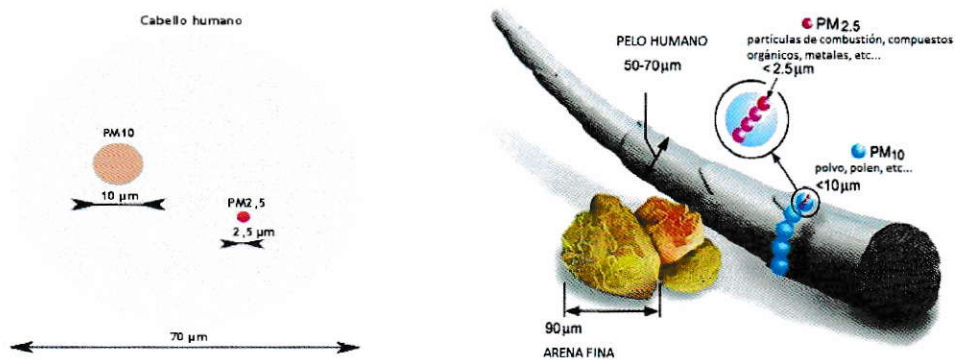


Figura 23. Escala gráfica de tamaños del material particulado (PM₁₀, PM_{2,5}) y arena fina en comparativa con el tamaño de un cabello humano.

1.16.1. Fuentes de material particulado

Las partículas atmosféricas pueden ser emitidas por una gran variedad de fuentes de origen natural o antropogénico (provocado por el hombre). Respecto a los mecanismos de formación, las partículas pueden ser emitidas como tales a la atmósfera (primarias) o bien ser generadas por reacciones químicas (partículas secundarias). Dichas reacciones químicas pueden consistir en la interacción entre gases precursores en la atmósfera para formar una nueva partícula por condensación, o entre un gas y una partícula atmosférica para dar lugar a un nuevo aerosol por adsorción o coagulación (Warneck, 1988).

Como resultado de esta variabilidad de fuentes y transformaciones, el material particulado atmosférico consiste en una mezcla compleja de compuestos de naturaleza orgánica e inorgánica con diferentes distribuciones granulométricas y composición química, ambas condicionadas por la composición de los gases que las rodean. Los niveles de material particulado atmosférico se suelen expresar en forma de concentración de masa o número de partículas por unidad de volumen de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ ó n/cm^3).

1.16.2. Efectos sobre la salud

El sistema respiratorio constituye la principal vía de entrada del material particulado en el organismo. La deposición de las partículas en diferentes partes del cuerpo humano depende del tamaño, forma y densidad de las partículas, así como de la respiración del individuo (nasal u oral). Posteriormente, los efectos que puede inducir el material particulado en el organismo dependen de la granulometría, la morfología y la composición química de las partículas, el tiempo de exposición y la susceptibilidad de cada persona. Todas las partículas de diámetro $<10\ \mu\text{m}$ (PM_{10} , partículas torácicas) tienen un tamaño suficiente para penetrar en la región traqueobronquial (ver Fig. 24), pero sólo aquellas de diámetro $<2.5\ \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$, partículas alveolares) pueden alcanzar la cavidad alveolar y, por tanto, provocar mayores afecciones.

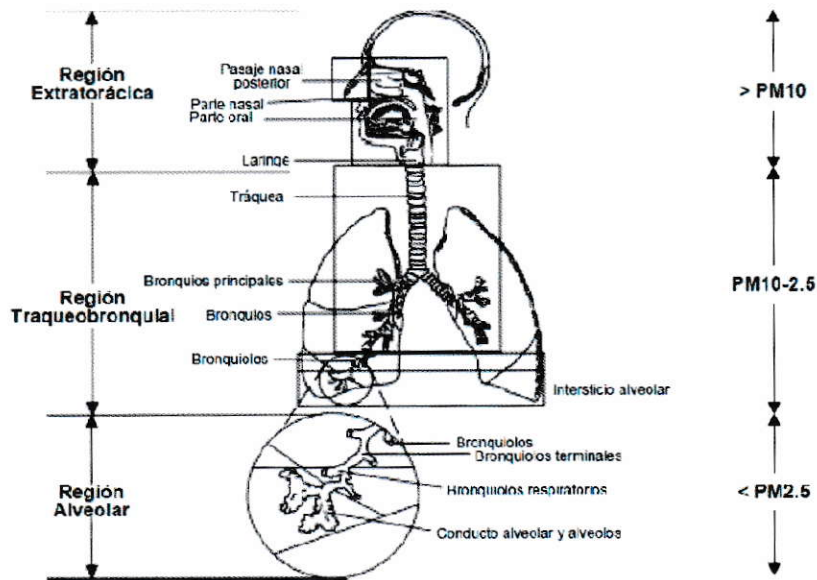


Figura 24. Representación de las zonas comprometidas y formas de inhalación en el cuerpo humano por el material particulado.

1.17. Problemática

Gracias a la composición del muro principal del Tranque de relave Las Tórtolas, principalmente de arenas de relave finas, y sumado a eventos de altas temperaturas, el material pierde su humedad y por consiguiente su cohesión, quedando propenso a la erosión eólica. Ésta situación provoca, eventualmente, que se genere un levantamiento del material particulado afectando parámetros operacionales y daños ambientales. Para aminorar dichos eventos, actualmente, se ocupa la técnica de riego de mediante aspersores como método de mitigación con agua extraída directamente de la cubeta y, de esta manera, se mantiene la humedad del material. Este riego abarca el coronamiento y gran parte del talud del muro en diferentes horarios, disminuyendo las emisiones del material. Aun así, en épocas de verano, siguen existiendo episodios con gran concentración de material suspendido.

El estudio tiene como objeto cuantificar el material particulado generado en las distintas zonas o secciones del muro para poder determinar el origen puntual donde ocurre el máximo levantamiento del material. La idea es determinar el transporte de la partícula y cuantificar las partículas en suspensión, saltación y arrastre. De este modo realizar un análisis general de lo que ocurre con el material constituyente del muro para luego evaluar el actual sistema de abatimiento de material.

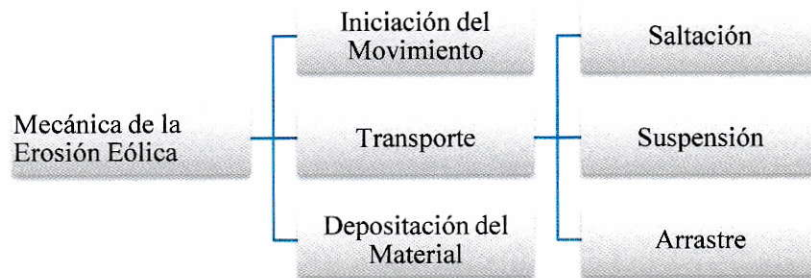


Figura 25. Esquema de mecánica de la erosión eólica.

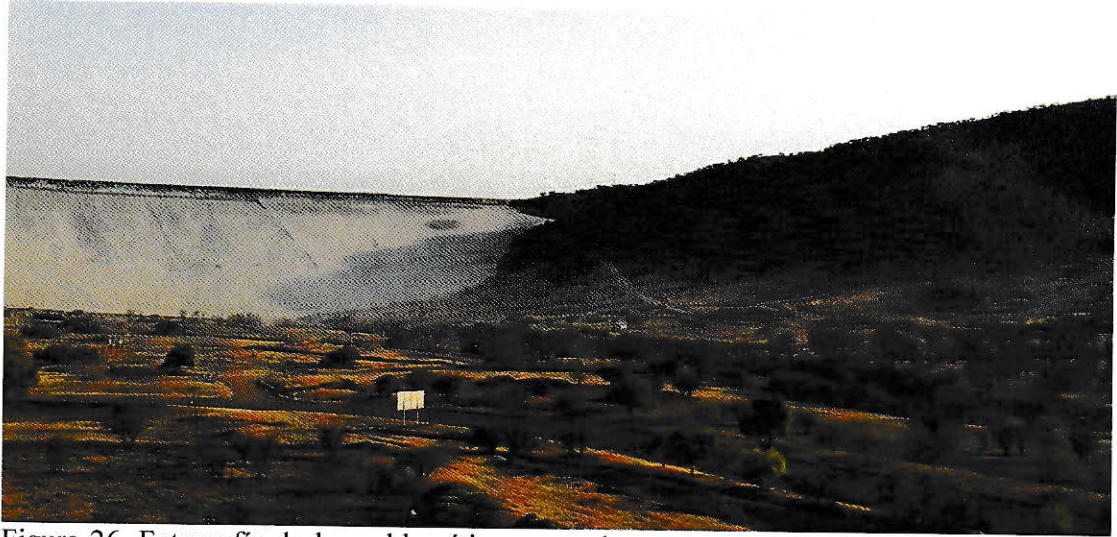


Figura 26. Fotografía de la problemática generada en el muro principal; arrastre de material particulado.

1.18. OBJETIVOS

1.18.1. Objetivo General

- Analizar y estudiar el sistema actual de abatimiento de material particulado en el Tranque de relave Las Tórtolas y el origen del material particulado presente en el muro principal del Tranque.

1.18.2. Objetivos Especificos

- Determinar la procedencia del material particulado en el muro principal del Tranque de relave Las Tórtolas.
- Cuantificar partículas de saltación y arrastre en los diferentes sectores del muro principal del Tranque.
- Cuantificar partículas en suspensión (PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁) en los diferentes sectores del muro principal del Tranque.
- Analizar comportamiento y alcance de la partícula en suspensión.
- Estudiar el efecto de la erosión eólica sobre el muro.
- Realizar recomendaciones para la mejora del sistema de mitigación de material particulado.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación se describen los antecedentes de importancia para la metodología realizada en el estudio.

2. Antecedentes

2.1. Área de Muestreo

El área donde se realizó el muestreo corresponde al muro principal del Tranque de relave Las Tórtolas y el área circundante. Para mayor entendimiento, el muro se dividió mediante los sectores operacionales de la empresa.

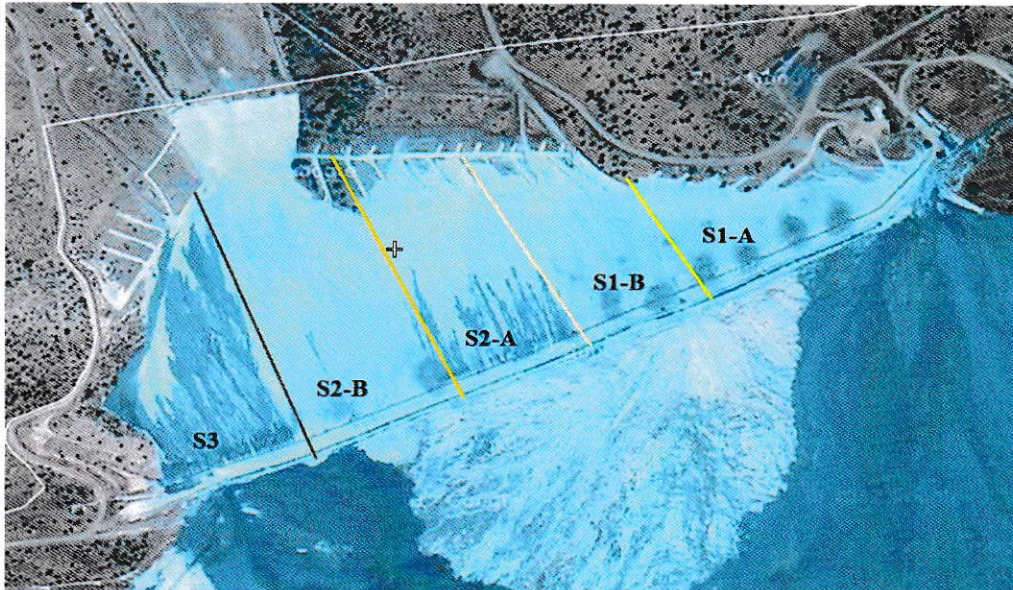


Figura 27. Representación de sectores del Muro Principal Las Tórtolas dividido por los sectores operacionales de la empresa.

2.1.1. Tipos de muestreos

El muestreo realizado para el posicionamiento de las trampas de Leatherman fue mediante una distribución sistemática y para el muestreo de material particulado se asignaron coordenadas y puntos fijos representativos por los cinco sectores a analizar, mediante la observación de los sectores más comprometidos al

levantamiento de material, de este modo se determinó los puntos específicos representativos para las diferentes mediciones.

2.1.2. Toma de muestras y preservación

Todas las muestras de suelo fueron tomadas a nivel superficial a 10-30 cm de profundidad colectadas con palas plásticas, envasadas en bolsas plásticas tipo Ziploc y transportadas al laboratorio.

2.1.3. Análisis en el laboratorio

Los análisis de laboratorio realizados a las muestras de suelo fueron efectuadas tanto en el laboratorio interno de la empresa, como en un laboratorio externo de la empresa. Los análisis microscópicos y mineralógicos fueron realizados por personal de la empresa AngloAmerican Sur S.A. Las muestras de suelo para el análisis químico de metales fue realizado en el laboratorio externo SGS.

2.2. Factores de muestreo

2.2.1. Tiempos de Operación

La depositación y compactación de las arenas de relave se realiza a través de camiones Bulldozer. Trabajan 12 horas, en turnos, sobre todo el muro. Por tanto, cualquier tipo de medición estuvo sujeta a la coordinación con los horarios propios de éste trabajo, como la coordinación con los sectores del muro que se encuentran disponible para las mediciones, ya que cualquier trabajo dentro de éste puede dañar los instrumentos a utilizar.

2.2.2. Dimensiones del Muro

El Muro Principal tiene dimensiones de gran tamaño, por tanto, su división para la distribución de los puntos de muestreo se simplifica en sectores para su análisis posterior; 1-A, 1-B, 2-A, 2-B, 3 y divisiones por secciones para abarcar un territorio representativo de muestreo; coronamiento, talud 2/3, talud 1/3 y pies del Muro.

2.2.3. Autorizaciones

Toda medición fue autorizada por el personal de trabajo del Tranque de relaves, por lo que el plan de muestreo se presentó a las autoridades pertinentes para la organización de los tiempos de medición.

2.2.4. Condiciones Climáticas

Debido a que una parte del estudio se enfoca en los episodios críticos (altas temperaturas y velocidad de vientos) se consideró la planificación del muestreo en los días más representativos de estos episodios.

2.2.5. Sistema de Riego

Debido al sistema de riego presente en el muro, mediante aspersores, se coordinó los diferentes muestreos con el equipo de operación para que la colocación de las trampas de Leatherman, junto con la medición de material particulado no fuera afectada por el agua proveniente del riego.

2.3. Medición de partículas de saltación y arrastre.

Para la medición del material removido y arrastrado se utilizaron las trampas de saltación pasiva. Dichas trampas, denominadas Lethearman (S.P Leatherman, 1978)

tienen como objetivo captar el material depositándolo en su interior. Consisten en un tubo de PVC de 1 metro con dos aperturas de diámetros conocidos. Una de las aperturas está cubierta con una malla fina que permite el paso del viento sobre la trampa. La otra apertura tiene dimensiones conocidas y la cara es dirigida hacia el viento. La trampa es instalada de manera que el comienzo de la abertura esté situado a nivel del suelo y el resto de la trampa enterrada. El material entra a la trampa por la abertura y no puede escapar de la malla dispuesta en la siguiente abertura cayendo sobre el tubo recolector de la trampa.

Las mediciones de la cantidad de partículas atrapadas se pueden realizar de las siguientes maneras;

- a) medir la altura donde llega el material en el tubo recolector.
- b) retirar el material recolectado y pesarlo mediante balanza analítica

Luego de las mediciones pertinentes se inserta un nuevo tubo recolector en la trampa y se posiciona en un nuevo lugar para analizar.

En el estudio se utilizaron las trampas de Leatherman (ver Fig. 28) para mediciones cuantitativas de las partículas de saltación y arrastre del muro. Se colocaron en dirección hacia el viento para determinar los puntos donde existe mayor desprendimiento de material en los diferentes sectores del muro. Debido a las operaciones realizadas en el muro, el estado de las arenas está en constante cambio, por tanto, las trampas se posicionaron cuando las arenas del muro estaban compactadas y secas (ver 4 en Fig. 29).

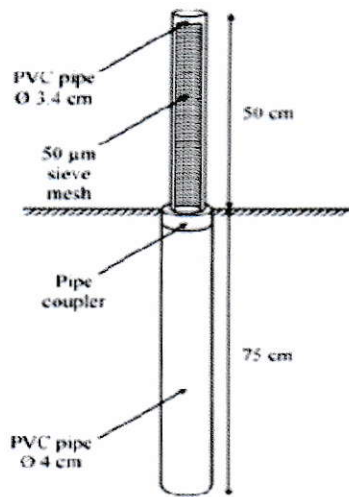


Figura 28. Representación de trampa de saltación pasiva (trampa de Leatherman).

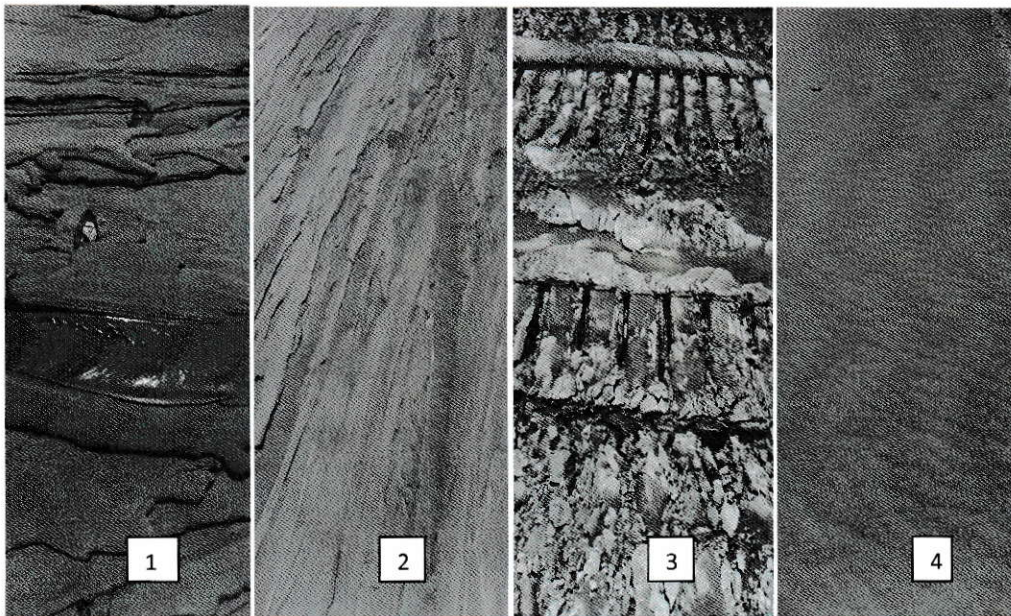


Figura 29. Diferentes estados de las arenas; 1: Arena recientemente depositada, 2: Arena seca depositada, 3: Arena suelta, 4: Arena compactada seca.

2.4. Muestreo para trampas de Leatherman

El muestreo de las trampas de Leatherman fue realizado desde el 15 de Noviembre del 2012 hasta el 8 de Febrero del 2013, correspondiente a 8 posicionamientos de las trampas en los 5 sectores del muro (1-A, 1-B, 2-A, 2-B y 3). En cada sector se colocaron 9 trampas (a excepción del sector 1-A, con 10 trampas) siguiendo un muestreo de distribución sistemática, abarcando todo el sector. El muestreo general se encuentra en el anexo A. Para el posicionamiento se utilizó chuzo y pala para realizar el agujero en donde luego se instalaron. Las coordenadas de dónde se colocaron las trampas fueron obtenidas mediante un GPS. Las trampas se dejaron por un periodo de 7 días. Luego de este tiempo se retiraron y se llevaron a laboratorio para su correspondiente pesaje (ver Fig. 30). A continuación se muestra en la Tabla 5 las diferentes fechas del muestreo.

Tabla 3. Fechas de muestreo de las Trampas de Leatherman y su correspondiente sector.

Fecha	Sector
15/11/2012	1-A
27/12/2012	1-B
28/12/2012	1-B
21/1/2013	2-A
5/2/2013	2-B
8/2/2013	2-B
30/11/2012	3
4/12/2012	3



Figura 30. Procesos de metodología para las trampas de Leatherman.

2.5. Medición de material particulado.

Por medio del equipo Dustmate (ver Fig. 31) se realizaron las mediciones del material particulado. Este equipo permite cuantificar la cantidad de partículas respirables (PST, PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_1), mediante una bomba interna de 600 cc/min de capacidad, siendo capaz de obtener una muestra de aire circundante.

Las partículas absorbidas son analizadas en cantidad y tamaño por un fotómetro láser, entregando resultados para la concentración de partículas expresadas en cantidad de partículas, en microgramos, por centímetro cúbico ($\mu\text{g}/\text{cm}^3$).

Se determinaron zonas para realizar las mediciones puntuales de material particulado en suspensión (PST, PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1). Las mediciones fueron realizadas en los sectores 1-A, 1-B, 2-A, 2-B y 3 mediante un esquema aprobado por el grupo de operación del Tranque. Para sostener el equipo se utilizó un trípode que lo ubica a los 1,5 metros sobre el suelo.

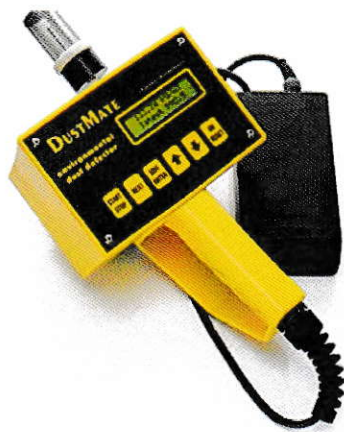


Figura 31. Equipo Dustmate para la determinación de material particulado (PST, PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1).

2.6. Muestreo para la medición de material particulado.

Del muestreo total se midieron 1727 minutos, correspondientes a 28,78 horas, repartidos en 11 mediciones en los diferentes sectores del muro principal y 4 mediciones fuera del muro, a 300 metros (cercano al dren basal), a 600 metros (cerro) y en un punto cercano a la playa arriba del S3 para observar el comportamiento del material luego de ser removido del muro (ver Fig. 34 y Fig. 35). Las mediciones abarcan desde el 9 de Enero de 2013 hasta el 7 de Febrero del 2013.

Los puntos determinados para el muestreo fueron elegidos mediante la observación de las zonas más comprometidas de levantamiento de material. Así se determinaron puntos fijos para los sectores 2-B y 3, representativos de esas zonas. Previamente se realizaron mediciones en la mañana en diferentes puntos de los sectores 1-A, 1-B y 2-A para determinar que el comportamiento del material particulado fuera homogéneo en diferentes puntos representativos del Muro, para priorizar las mediciones en horarios de condiciones críticas. Debido a las condiciones de alta velocidad de los vientos en la tarde, se realizó la mayoría de las mediciones en ese horario (entre 17:30-19:30 horas). Los horarios de muestreo dentro y fuera del muro se encuentran en el anexo A.

Los datos fueron obtenidos por el programa de Windows AirQ del instrumento Dustmate, que arroja los valores de concentración de partículas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Se eligió el modo de guardar los datos por minuto.

Paralelamente a las mediciones de material particulado con el instrumento Dustmate, se realizaron mediciones de la velocidad del viento, mediante un anemómetro.

El plan de muestreo general se encuentra en el anexo A, donde se muestran los siguientes parámetros:

Fecha de medición	Hora de inicio	Hora de término	Minutos de medición	Nº de muestra	Sector	Punto GPS	Coordenadas	Velocidad promedio de viento (m/s)	Velocidad máxima de viento (m/s)	Descripción de lugar de medición
-------------------	----------------	-----------------	---------------------	---------------	--------	-----------	-------------	------------------------------------	----------------------------------	----------------------------------

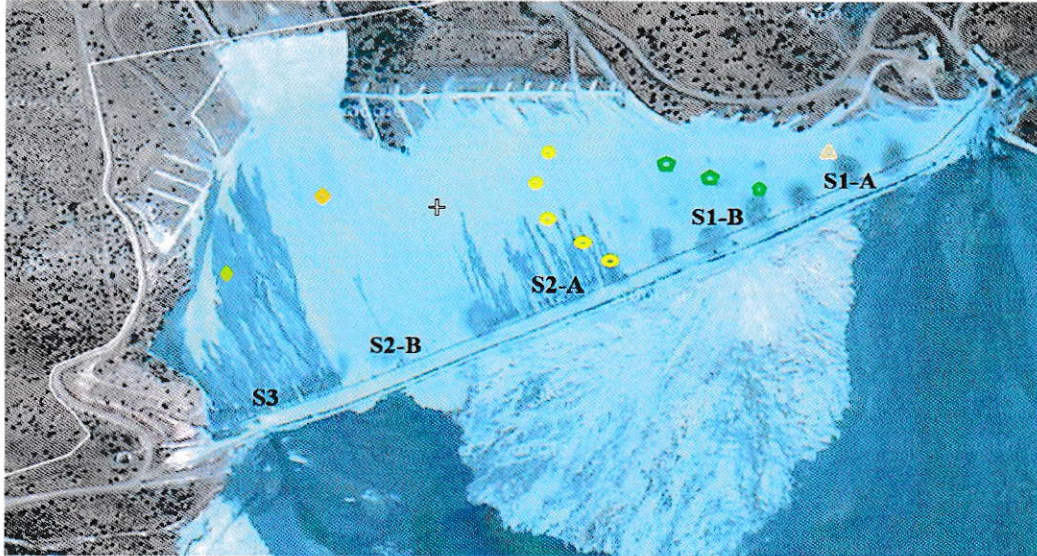


Figura 32. Puntos de muestreo de medición de material particulado y velocidad de los vientos, dentro del muro; en los diferentes sectores.

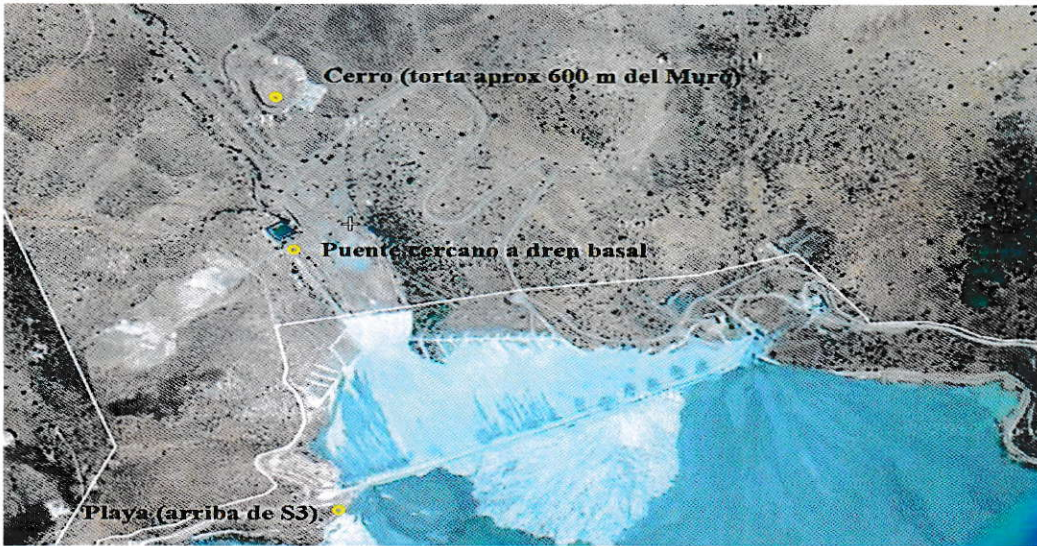


Figura 33. Puntos de muestreo de medición de material particulado y velocidad de los vientos, fuera del muro; cerro a 600 metros del muro, puente dren basal a 300 metros del muro y cubeta cercano al coronamiento de S3.

2.7. Medición de velocidad puntual de los vientos

La medición de la velocidad de los vientos se realizó con un anemómetro (ver Fig. 34), en conjunto con la medición de material particulado con el equipo Dustmate. Las velocidades se determinaron a una altura de 1,5 metros. Además se realizó un muestreo de velocidades que se dividió en 4 zonas estimativas (ver Fig. 35):

- Coronamiento
- Talud 2/3
- Talud 1/3
- Pies del Muro

En cada punto se realizaron mediciones de velocidad de vientos en forma horizontal.



Figura 34. Anemómetro, instrumento de medición de velocidad puntual de los vientos.

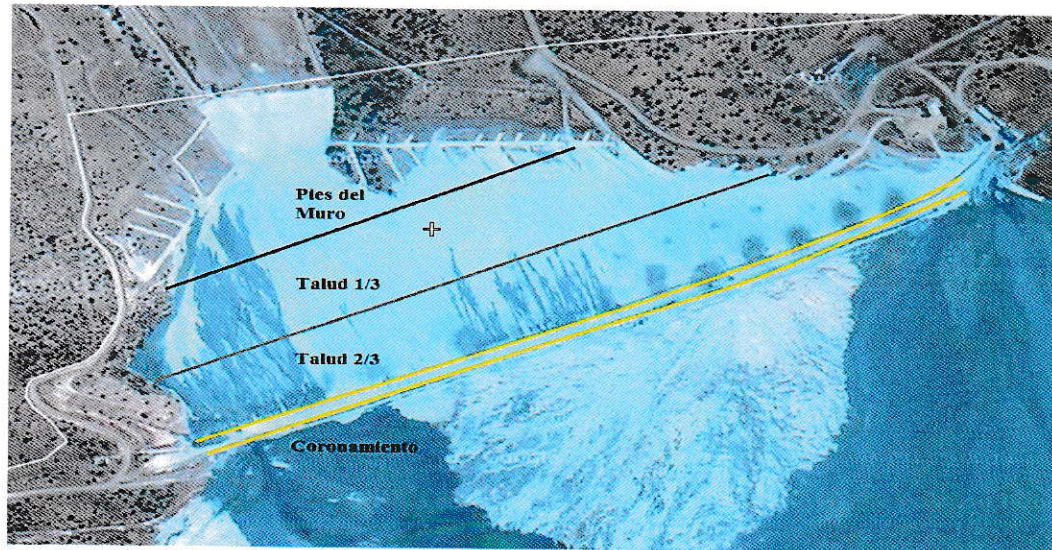


Figura 35. Representación de Muro Principal Las Tórtolas dividido en 4 zonas; Coronamiento, Talud 2/3, Talud 1/3 y Pies del Muro.

2.8. Medición de altura y coordenadas

Para la medición de alturas se utilizó un GPS Modelo GARMIN III (ver Fig. 36) que indica los m.s.n.m correspondientes a los puntos de muestreo, además de las coordenadas específicas para cada medición.



Figura 36. GPS Modelo GARMIN III.

2.9. Pesaje de muestras

El pesaje de muestras se realiza mediante una balanza analítica, donde las muestras son pesadas en vasos precipitados o Cápsulas Petri, dependiendo de la cantidad de material a cuantificar.

2.10. Muestreo de arenas de relave

El muestreo se realizó el día 23/1/2013 aproximadamente a las 10: 30 horas hasta las 11: 30 horas con el método de cuarteo en dos zonas de cada sector, de modo de obtener 10 muestras representativas para los 5 sectores (1-A, 1-B, 2-A, 2-B y 3). Además de 2 muestras de las lamas de la playa de la cubeta. Cada muestra contiene aproximadamente 100 a 150 g de arena, de donde 35 g se sacan de cada cuadrado del cuarteo correspondiente, entendiéndose como cuarteo la división del sector del muestreo en 4 partes. Luego de ser tabuladas se mandaron a laboratorio para su

correspondiente preparación y posterior análisis microscópico y mineralógico. En conjunto, se enviaron 12 muestras a análisis químico a un laboratorio externo, para obtener las leyes de CuT, Cu Sol, As, Mo y Fe.

Tabla 4. Enumeración de muestras y cuarteo para el muestreo de arenas de relave.

Sector	Cuarteo	Nº de muestra
1-A	1	1
1-A	2	2
1-B	1	3
1-B	2	4
2-A	1	5
2-A	2	6
2-B	1	7
2-B	2	8
3	1	9
3	2	10
Playa (Lamas)	-	11
Playa (Lamas)	-	12

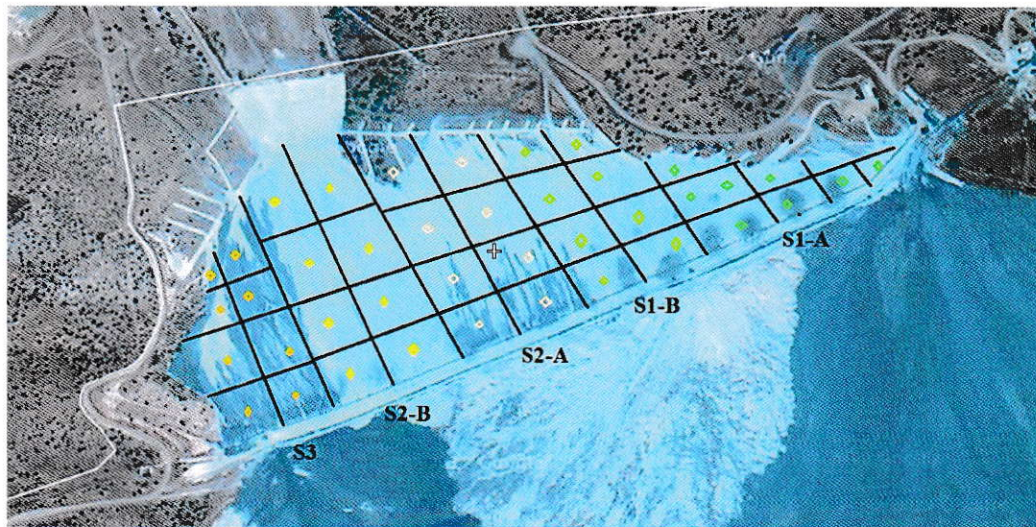


Figura 37. Representación de cuarteo de sectores en el muro principal.

2.11. Metodología para el análisis mineralógico y microscópico

El proceso de creación de briquetas conlleva múltiples procesos, principalmente de fundición y pulido. En tales briquetas, donde la muestra queda contenida, se realiza la observación, análisis e identificación de minerales mediante un microscopio (ver Fig 40). De esta técnica se pueden obtener microfotografías en aire, que permiten observar el contenido mineral de la muestra.

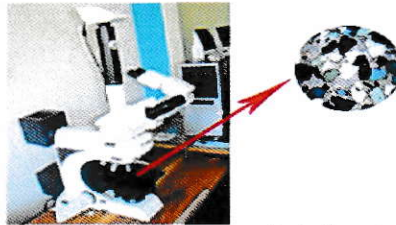


Figura 38. Representación de microscopio, junto a la briqueta que contiene la muestra a analizar.

2.12. Metodología para el análisis químico

El análisis químico de metales se realizó mediante la técnica de espectrofotometría de absorción atómica. Este método consiste en la medición de las especies atómicas por su absorción a una longitud de onda en particular mediante la atomización de la muestra. La técnica utilizada es la de absorción atómica con llama, que nebuliza la muestra y luego la disemina en forma de aerosol dentro de una llama de acetileno u óxido nitroso-acetileno, dependiendo de la especie a identificar difiere la técnica y accesorios.

2.13. Metodología para el análisis granulométrico

El análisis granulométrico se basó mediante la utilización de tamices. El tamizaje con mallas de alambre tejido permite determinar la distribución de tamaños en muestras de relave u otros materiales.

Los alambres de tales tamices se tejen de manera de formar aberturas cuadradas y el número de aberturas que existen en una pulgada en la dirección de los alambres se utiliza para especificar al número del tamiz. Para determinar la dimensión de la abertura, es necesario conocer el espesor de los alambres.

Varias instituciones han propuesto series estándar de tamices, en las cuales se especifican las dimensiones de las aberturas. Las más utilizadas son la serie U.S.A. Estándar (ASTM) y la Tyler Estándar. En el estudio se utiliza como referencia la serie Tyler.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1 Caracterización físico-química de las arenas de relave del Tranque las Tórtolas

En el presente estudio se realizó una caracterización físico-química de las arenas de relave para entender el alcance de estas propiedades en las operaciones realizadas en el Tranque y en especial en el muro principal, donde ocurre la problemática.

3.1.1. Análisis granulométrico

La distribución granulométrica se puede representar en forma tabulada que contiene los siguientes parámetros; el tamiz de la serie, la abertura nominal en mm del tamiz, la masa retenida de la muestra y los porcentajes retenidos en la malla y acumulado bajo la malla. A continuación se muestra la tabulación de la distribución granulométrica del relave característico del Tranque Las Tórtolas (Enero 2012).

Tabla 5. Ejemplo de distribución granulométrica, representada en forma tabulada. Corresponde a un promedio final de 12 muestras analizadas del Sector 2-A, sacadas a una profundidad de 0,3 y 0,6 m de profundidad.

Tamiz Tyler	Abertura Nominal (mm)	Masa Retenida (g)	% Retenido	% Acumulado Bajo
# 4	4,75	-	-	-
# 8	2,36	-	-	-
# 16	1,00	-	-	100
# 30	0,600	10,6	1,6	98
# 50	0,300	118,9	17,7	81
# 60	0,250	145,5	21,7	59
# 100	0,150	136,5	20,3	39
# 150	0,106	110,5	16,4	22

# 200	0,075	55,1	8,2	14
Peso Total		478,1		
Muestra				

* - significa que no se encontró masa retenida en ese tamiz.

La otra forma de representar la distribución granulométrica es mediante una curva.

Una curva granulométrica es una representación gráfica de la distribución del tamaño de partículas.

La curva es en escala de base logarítmica en el eje x que representa el tamaño de la partícula y en base natural en el eje y que corresponde al porcentaje retenido acumulado bajo la malla, que también se puede describir como el porcentaje más fino de la muestra, ya que constituye a las partículas que quedan retenidas bajo el tamiz. Mediante ella se puede determinar los diámetros característicos de la muestra.

Un aspecto importante y relevante para el trabajo con los relaves, es conocer y estudiar el tamaño de las partículas que lo componen. Como se ha mencionado las arenas y lamas son separadas por tamaño, para luego depositarlas en el muro y cubeta, respectivamente. La granulometría asociada a los relaves es propia del mineral extraído y de los procesos que le siguen en la obtención del concentrado. Para esto, el relave pasa por procesos físicos que modifican su tamaño.

El rango del tamaño de las partículas de los relaves puede ser muy diverso y propio de cada planta, pero existen distribuciones granulométricas características de los relaves completos, en la Fig. 39 se muestra en la zona amarilla el rango típico de los relaves completos o integrales (3) y la curva de la fracción fina y gruesa, en rojo y amarillo, correspondiente a las lamas (1) y las arenas (2).

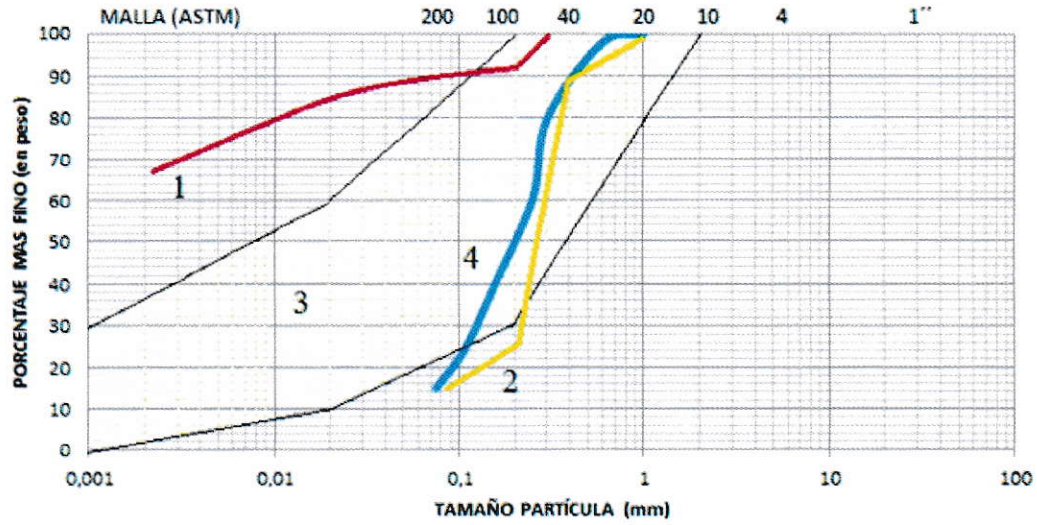


Figura 39. Distribuciones granulométricas típicas de relaves de Cobre.

A continuación en la Fig. 40 se muestra la curva granulométrica de las arenas del Muro principal Las Tórtolas.

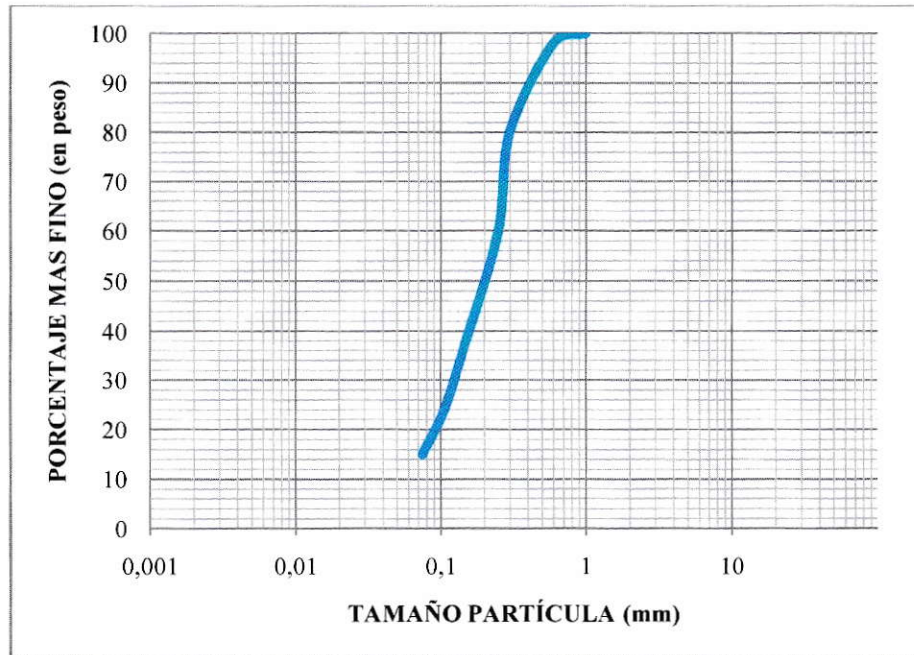


Figura 40. Curva granulométrica de las arenas del Muro Principal Las Tórtolas.

Se observa que la distribución granulométrica del Muro principal Las Tórtolas (Fig. 40) en comparación con la distribución granulométrica típicas de relave (ver 4 en

Fig. 39) se encuentra en el rango de la curva de arenas (fracción gruesa, underflow) y contiene partículas que van desde tamaños de 0,075 mm a 1 mm.

En las Figuras 41, 42 y 43 se muestran los gráficos granulométricos de los años 2010, 2011 y 2012. Todas poseen granulometrías parecidas.

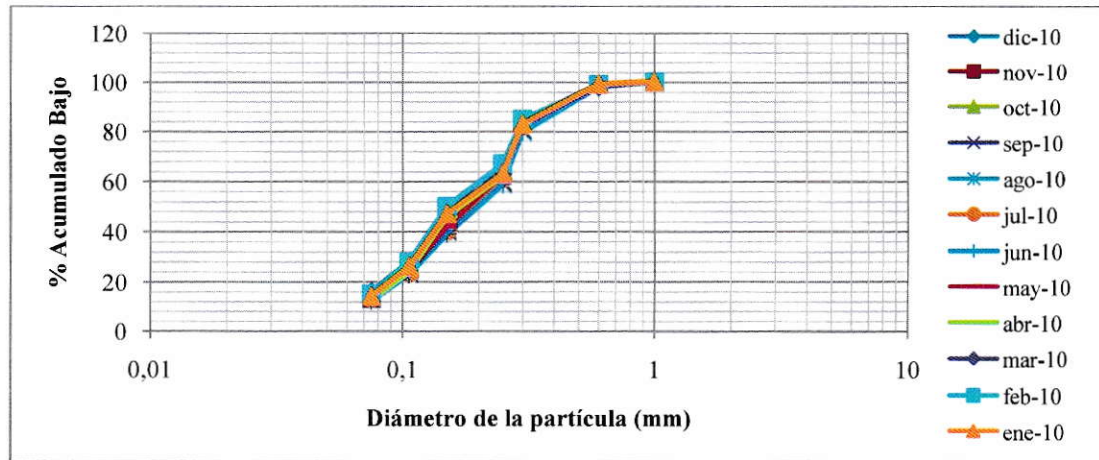


Figura 41. Curva granulométrica del Muro Principal del año 2010.

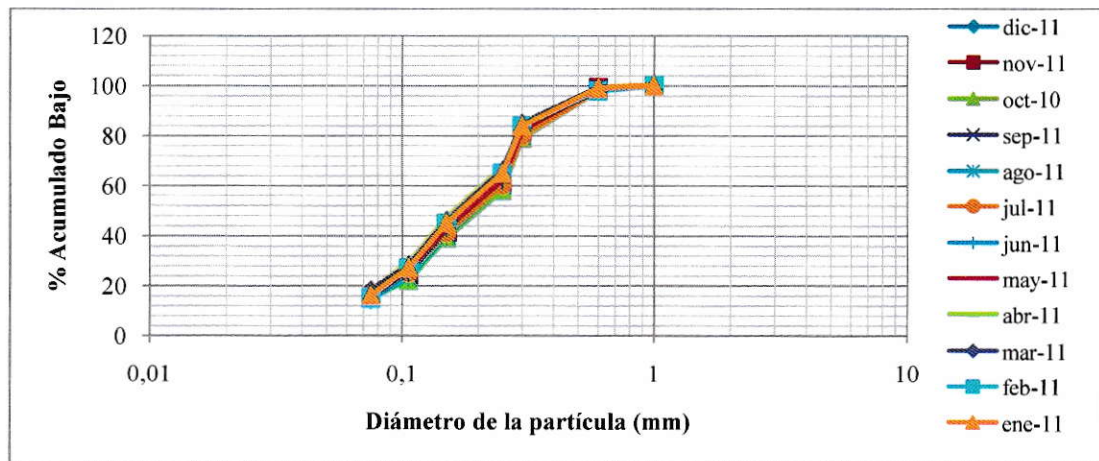


Figura 42. Curva granulométrica del Muro Principal del año 2011.

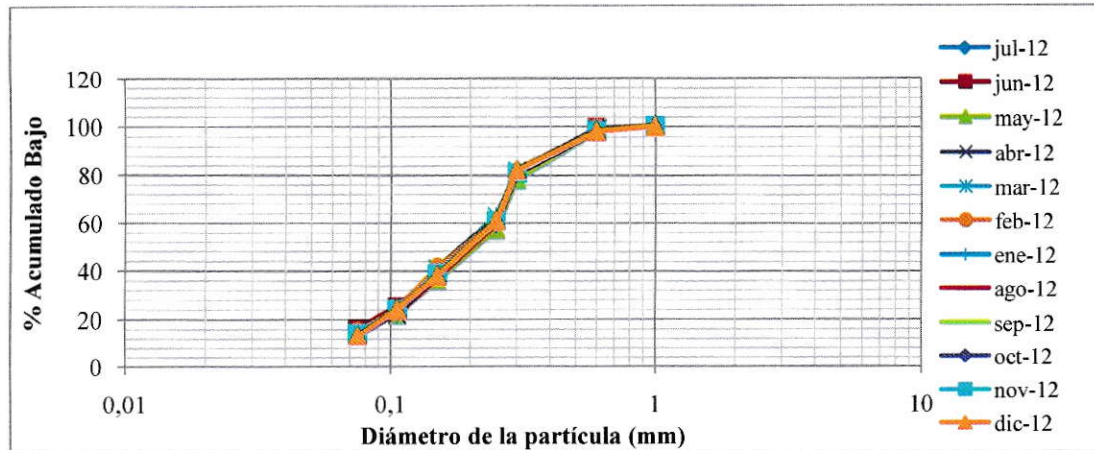


Figura 43. Curva granulométrica del Muro Principal del año 2012.

Mediante la curva granulométrica se puede determinar si la muestra es homogénea o heterogénea con respecto al tamaño de partículas que contiene. Para caracterizar la muestra, se obtiene de la curva los D_n , que representa el diámetro característico de n porcentaje acumulado bajo el tamiz. Por ejemplo, el D_{50} es el diámetro donde el 50% de la muestra es menor que ese tamaño de partícula y donde pasa el 50% del material por ese tamiz.

En la Fig. 44 se presenta la curva granulométrica del mes de Julio del 2012, junto a su correspondiente ecuación.

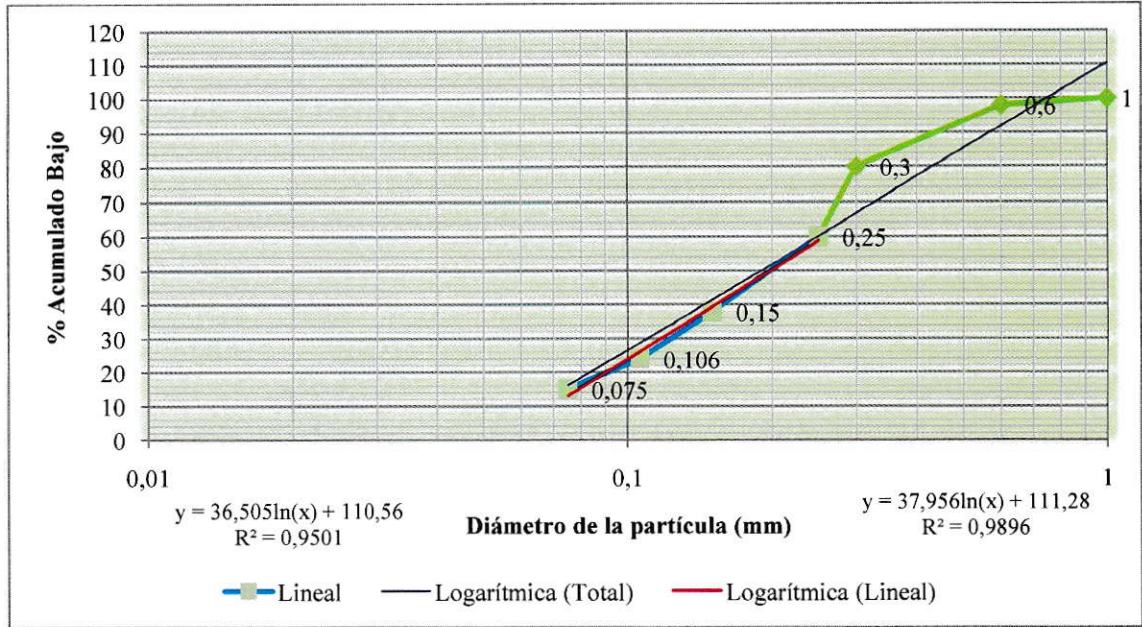


Figura 44. Curva Granulométrica Muro Principal del mes de Julio del 2012.

Para calcular el D_n de ésta curva granulométrica se utiliza la ecuación:

$$y = 37,956 \ln(x) + 111,28$$

Donde;

y: % acumulado bajo

x: diámetro de la partícula a conocer; D_n

Por ejemplo, para D_{50} , se tiene;

$$50 = 37,956 \ln(x) + 111,28$$

$$\ln(x) = \frac{50 - 11,28}{37,956}$$

$$x = e^{-1,61}$$

$$x = 0,19$$

Esto indica que 50 % de la muestra son partículas de diámetro menor a 0,19 mm.

Tabla 6. Propiedades de gradación de relave integral.

Propiedades de Gradación de Relave Integral	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	D ₉₀ (mm)	C _u	C _c	D _m
	0,063	0,11	0,19	0,25	0,45	3,96	0,76	0,17

El coeficiente de uniformidad, definido originalmente por Terzaghi y Peck, se utiliza para evaluar la uniformidad del tamaño de las partículas de un suelo. Se expresa como la relación entre D₆₀ y D₁₀, siendo:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Donde;

D₆₀= el diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 60% del suelo, en peso; y,

D₁₀ = el diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 10% del suelo, en peso.

Un suelo con un coeficiente de uniformidad menor de 3, se considera muy uniforme. En el límite, si un terreno estuviera formado por esferas perfectamente iguales, su coeficiente de uniformidad sería 1. El suelo cuya curva granulométrica se presenta en el gráfico (Fig. 46), con C_u = 3,96, podría ser llamado una "Arena limosa bien uniforme".

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0,25mm}{0,063mm} = 3,96$$

El coeficiente de concavidad, proporciona información sobre si el suelo está bien o mal graduado. Un suelo bien graduado tiene proporciones equilibradas de arena, limo y arcilla. Si no existe diversidad en el tamaño de las partículas el suelo estará mal

graduado. Un valor cercano a uno indica que el suelo está bien graduado, mientras que valores mucho menores o mucho mayores indican suelos con una granulometría muy diversa. En general los suelos bien graduados se compactan mejor y pueden adquirir permeabilidad y deformabilidad más bajas.

$$C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$$

Donde;

D_{60} = el diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 60% del suelo, en peso; y,

D_{10} = el diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 10% del suelo, en peso; y,

D_{30} = el diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 30% del suelo, en peso.

Para la granulometría de la arena de relave presente en Las Tórtolas se tiene que el coeficiente de concavidad es:

$$C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} = \frac{(0,11mm)^2}{0,063mm \cdot 0,25mm} = 0,77$$

Es un valor cercano a uno, lo que indicaría una “arena graduada”.

Como resultado se tendría un análisis granulométrico que indica una arena limosa uniforme y graduada. Ésta característica ayuda a la mejor compactación de las arenas del Muro.

Otro parámetro es el diámetro medio de las partículas, éste indica el diámetro representativo de la muestra. D_m : Diámetro medio de las partículas del material granular en (mm), definido como:

$$D_m = \frac{\Sigma(D_i * P_i)}{100}$$

Tabla 7. Porcentajes ponderados de diámetros representativos de la muestra.

D_i Diámetro (mm)	P_i % Retenido	D_i*P_i
4,75	-	-
2,36	-	-
1,00	-	-
0,600	1,6	0,96
0,300	17,7	5,31
0,250	21,7	5,43
0,150	20,3	3,05
0,106	16,4	1,79
0,075	8,2	0,62
Total	-	17,09

* - significa que no se encontró masa retenida en ese tamiz.

Por tanto;

$$D_m = \frac{\Sigma(D_i * P_i)}{100} = \frac{17,09}{100} = 0,17mm$$

En la Fig. 47 se observa que la distribución posee partículas de un tamaño uniforme, más del 60% corresponden al rango de 0,3-0,15 mm y el 23% al rango de 0,106-0,075 mm. El resto responde a una fracción fina (limo) que equivale aproximadamente al 15% de partículas con un diámetro menor a 0,075mm, que generalmente en estudios de relave se le conoce como la fracción bajo malla #200, o fracción de finos.

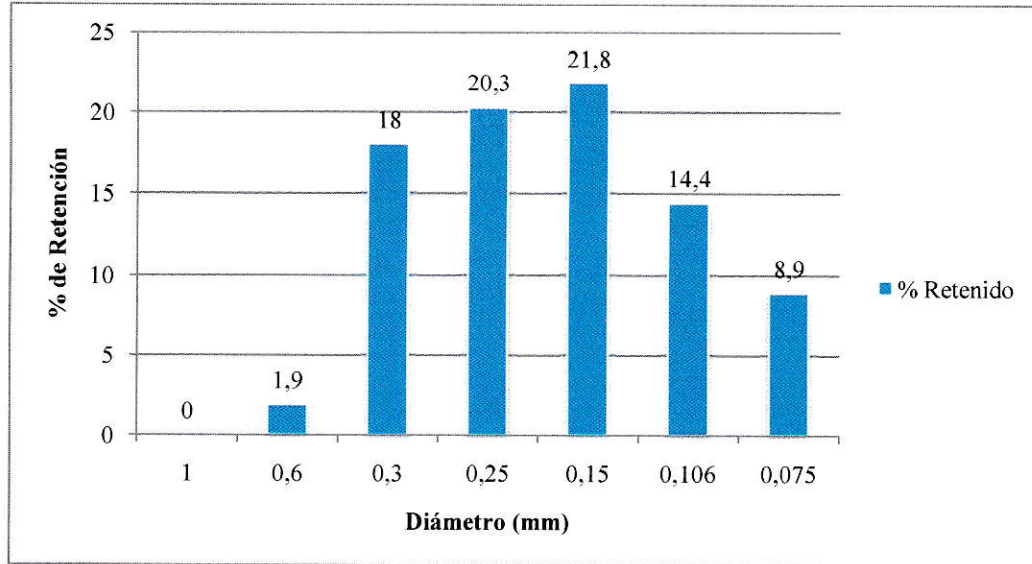


Figura 45. Fracción Retenida en porcentaje de partículas presentes en el muro principal.

La óptima composición granulométrica es aquella donde se combinan granos finos, medianos y gruesos para dar máxima compacidad (sin huecos) al conjunto. En la Fig. 45 se observa que la distribución tiene un parecido a una campana de Gauss, lo que indica que existen partículas de diversos tamaños, donde todos los espacios que dejan los granos más grandes, los llenan los medianos, y a la vez los espacios de los medianos, los llenan los finos, propiedad que ayuda a la mejor compactación del suelo. Característica esencial para la operación en los muros de arenas de Tranques de relave.

A partir del tamaño de las partículas del suelo, se puede determinar su textura. A continuación en la Fig. 46 se muestra la clasificación del suelo del muro principal y en la Tabla 8 la clasificación de suelos por el USCS.

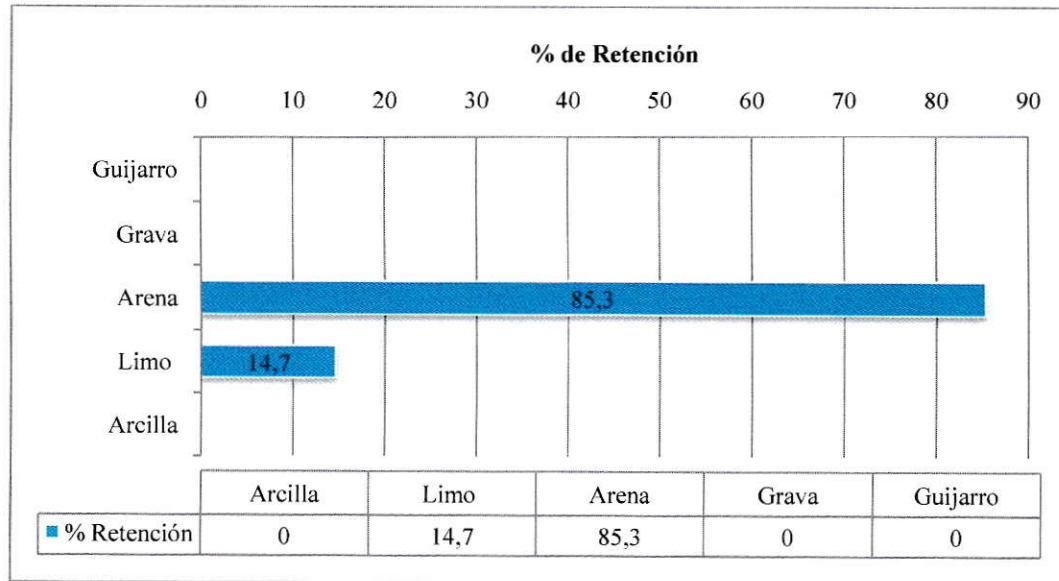


Figura 46. Clasificación de suelo (Textura) del muro principal.

La clasificación de suelos es la siguiente:

Tabla 8. Clasificación de suelos por el USCS.

Sedimento	Diámetro (mm)
Guijarro	64-4,0
Grava	4,0-2,0
Arena	2,0-0,0625
Limo	0,0625-0,0039
Arcilla	0,0039-0,0049

La clasificación por tamaño define al suelo como arena, pero al pasar por procesos químicos hasta llegar a ser relave final pueden poseer compuestos externos. Es más bien una arena posiblemente contaminada, asociada a algún tipo de residuo metaloide. Arenas, arenas de relaves, o relaves arenosos, son materiales predominantemente más grandes que 0,074 mm lo que significa que menos del 50% son más finos que ese tamaño.

Cabe decir, que la arena que es transportada por el viento, se le llama arena eólica (pudiendo provocar el fenómeno conocido como calima). La granulometría de la arena eólica está muy concentrada en torno a los 0,2 mm de diámetro de sus partículas, como lo son, en este caso, las arenas estudiadas.

3.1.2. Análisis mineralógico.

La mineralogía nos describe que tipo de minerales componen una muestra. Para el caso, el mineral extraído en la mina pasa por el proceso de concentrado hasta llegar a ser un relave, cambiando su composición mineralógica.

En la alimentación a la planta Las Tórtolas, se distinguen principalmente las siguientes especies: Calcopirita (CuFeS_2), Calcosita (Cu_2S), Covelina (CuS), Bornita (Cu_5FeS_4) y Enargita ($\text{Cu}_2\text{As}_4\text{S}_4$), siendo la calcopirita el mineral de cobre predominante.

Siempre se realizan análisis mineralógicos en las plantas de concentrado, debido a la importancia de los tipos de minerales que vienen de la roca puesto que tienen estricta relación con la obtención de cobre. En la Tabla 50 (Anexo F) se muestra la mineralogía general de la Planta en porcentaje y en la Fig. 47 se grafica.

Se observa en la Fig. 47 que desde la alimentación de la planta, al pasar por el proceso de concentrado se va aumentando el porcentaje de calcopirita y disminuyendo el porcentaje de pirita. Además de disminuir el porcentaje de cuarzo, feldespatos y micas, especies que aparecen luego en el relave final.

Si se compara el contenido de minerales de cómo llega la ganga a la alimentación planta y como sale en el relave final, la mayoría del contenido mineral es parecido, variando sólo el porcentaje de calcopirita y pirita que remplazan su valor. Es decir, el contenido de calcopirita de la ganga de alimentación es remplazada por la pirita en el relave final.

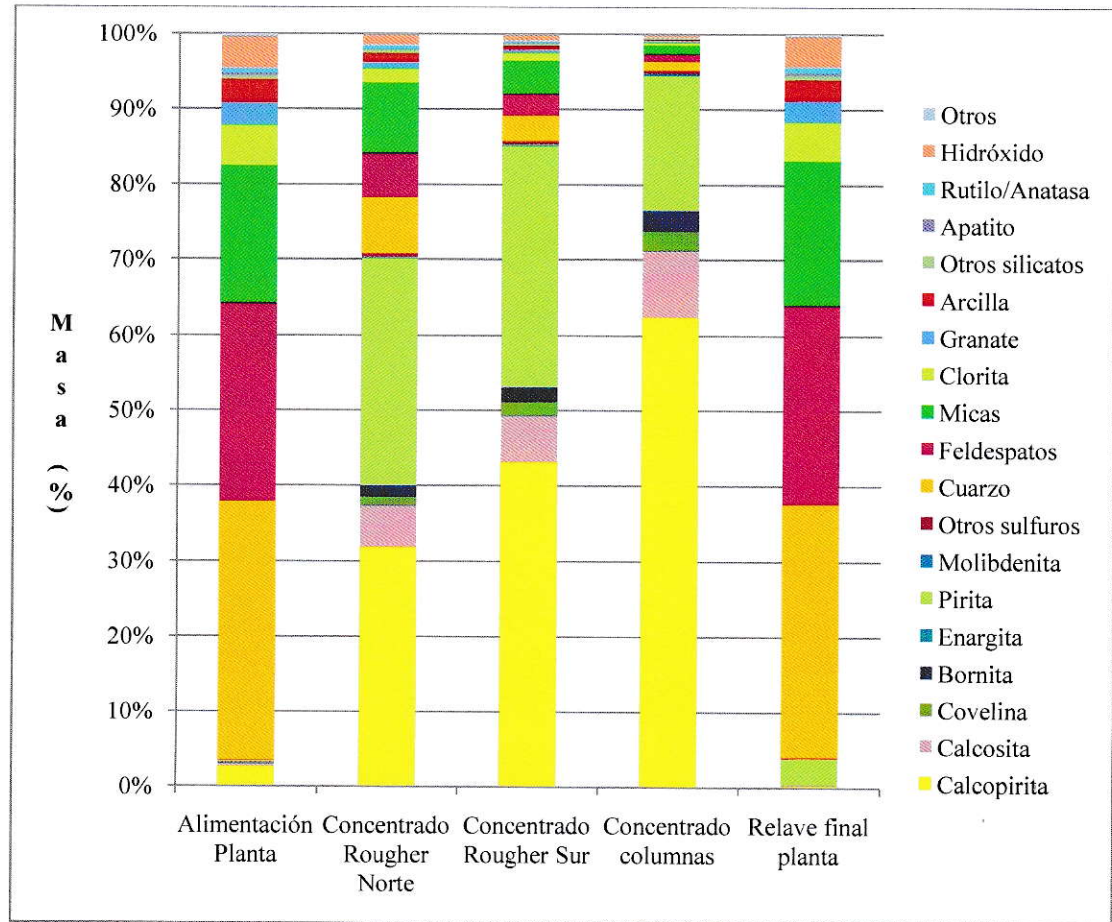


Figura 47. Mineralogía Planta Las Tórtolas

En el estudio, se efectuó un análisis mineralógico a una muestra de arenas de relaves (ver muestreo en punto 2.10.) del Tranque, cuyos resultados se resumen en la Tabla 9 y se grafican en la Fig. 48.

Tabla 9. Resumen análisis mineralógico.

ELEMENTO	Porcentaje (%)
Cuarzo	45
Moscovita– Sericita	30
Plagioclasas	15
Minerales opacos	5
Biotita	4
Minerales de Arcilla	1

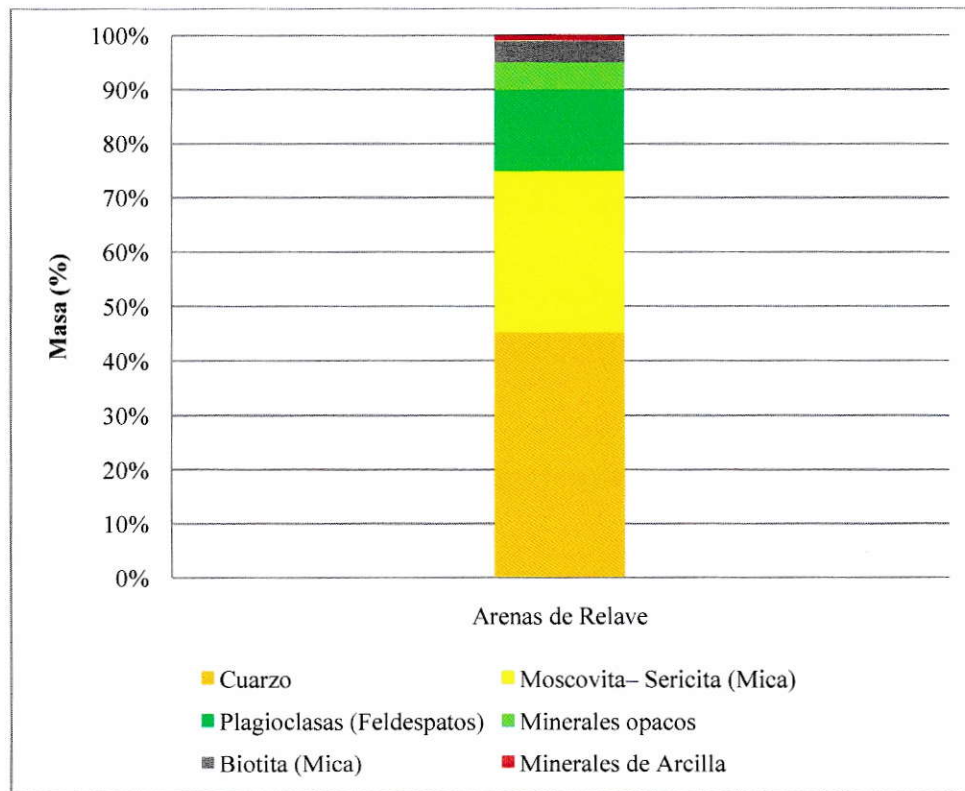


Figura 48. Análisis mineralógico de las arenas de relave.

Es necesario mencionar, que el componente más común de la arena, en tierra continental y en las costas no tropicales es el sílice, generalmente el cuarzo. Sin embargo, la composición varía de acuerdo a los recursos y condiciones generales de la roca. En algunos lugares existe arena que contienen hierro, feldespato o incluso yeso.

Se observa en la Fig. 48 que las arenas de relave ensayadas contienen un alto porcentaje de partículas cuarzadas (arena cuarzosa) y un bajo contenido de arcillas, lo cual implica que los granos constitutivos de las mismas son relativamente duros. Además, de acuerdo al origen de estos materiales, chancado y molienda, la forma de los granos sería angulosa (ver Fig. 49).

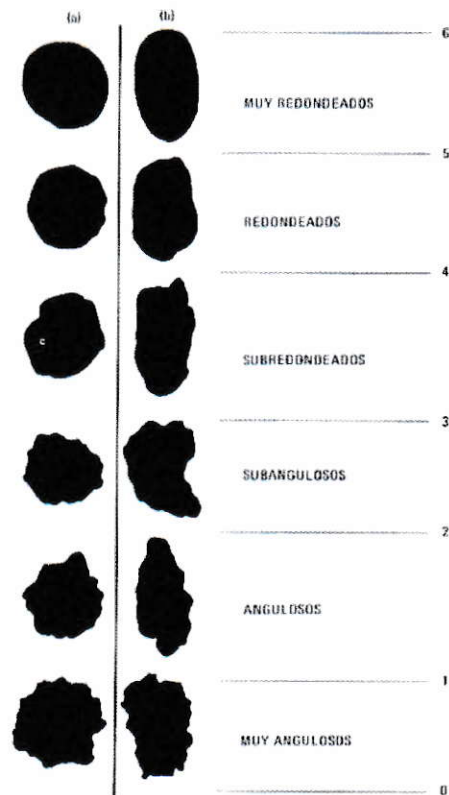


Figura 49. Grados de redondez para suelos con (a) alta y (b) baja esfericidad.

Para el caso de suelos compuestos de partículas con forma granular, la trabazón entre partículas ayuda a la mayor compactación del suelo y la fricción que se origina entre ellas contrarresta el deslizamiento de unas respecto a otras, como se muestra en la Fig. 49. A este comportamiento se lo identifica como la cohesión para el caso de suelos granulares, donde el suelo presenta resistencia contra su disgregación ocasionada por un agente externo.

El grado de cohesión que presentan los suelos granulares, está en función a la textura de las partículas de forma granular. La partículas con textura angular (ver Fig. 50(a)) logran que el suelo tenga cohesión, mientras que las partículas con textura redondeada (ver Fig. 50 (b)) no contribuyen a la cohesión del suelo.

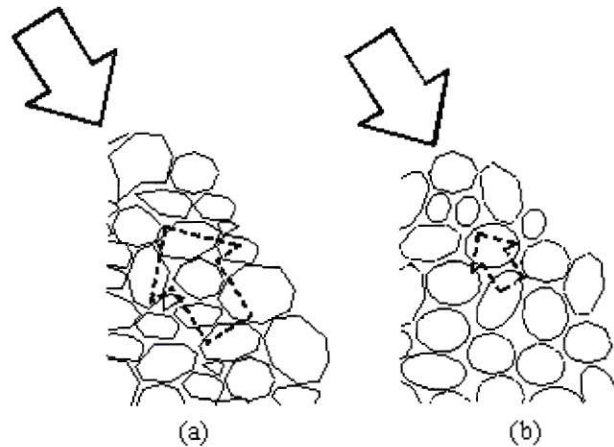


Figura 50. Estructuras que dan cohesión a suelos granulares. Se muestra el efecto de partículas con textura angular (a) y con textura redondeada (b).

En el caso de las arenas estudiadas la textura angular ayuda a la cohesión y compactación de las arenas en el muro.

3.2.3. Análisis microscópico.

Se analizaron 12 muestras correspondientes a distintos sectores del muro en estudio, para definir, principalmente, la caracterización mineralógica y, en especial, la identificación de aquellos minerales que contengan Arsénico en su composición.

En la composición, en términos mineralógicos, de las 12 muestras, se observa un comportamiento normal y en línea con los análisis habituales de relaves. Mayoritariamente se observan minerales de óxidos de hierro como Magnetita (Fe_3O_4), Hematita (Fe_2O_3) y sulfuros de hierro como Pirita (FeS_2).

En menor grado se observan sulfuros y óxidos de Cobre liberados y asociados, la mayoría de ellos ocluidos en Gangas.

Respecto de los minerales de Arsénico, se observó solamente Enargita ($\text{Cu}_2\text{As}_4\text{S}_4$), pero a nivel de trazas, en las muestras N° 2, N° 8 y N° 9.

La granulometría de las muestras N° 1 a la N° 10 es similar en todas ellas, y su tamaño modal se ubica alrededor de los 350 micrones. La granulometría de las muestras N° 11 y N° 12 son similares y su tamaño modal se ubica en los 250 micrones.

Se considera que el análisis ilustra aproximadamente la mineralogía de un 5% de la muestra. El otro 95% corresponde a ganga. Minerales observados, en orden cuantitativo:

- Hematita (Fe_2O_3)
- Magnetita ($\text{Fe}^{+2}(\text{Fe}^{+3})_2\text{O}_4$)
- Pirita (FeS_2)
- Rutilo (TiO_2)
- Delafossita (CuFeO_2)
- Calcopirita (CuFeS_2)
- Calcosina (Cu_2S)
- Bornita (Cu_5FeS_4)
- Covelina (CuS)

Trazas:

- Enargita ($\text{Cu}_2\text{As}_4\text{S}_4$)
- Cuprita (Cu_2O)

- Limonita ($\text{FeO}(\text{OH})n\text{H}_2\text{O}$)
- Esfalerita (ZnS).

A continuación se muestran las microfotografías del análisis microscópico;

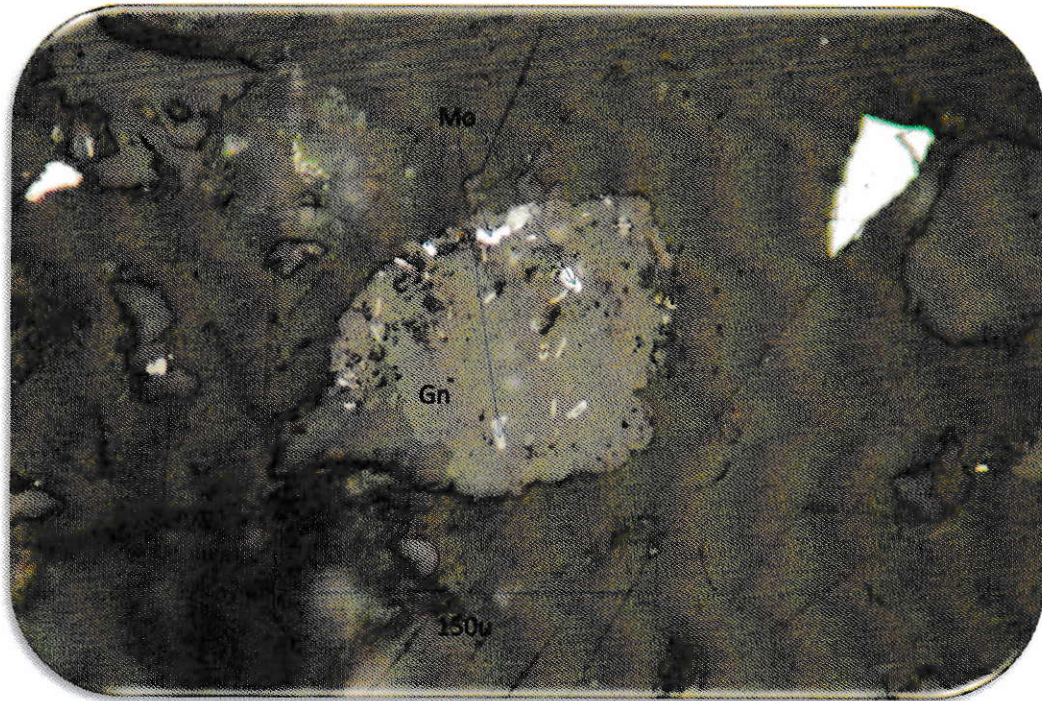


Figura 51. Presencia de Mo en ganga de 150 micrones.

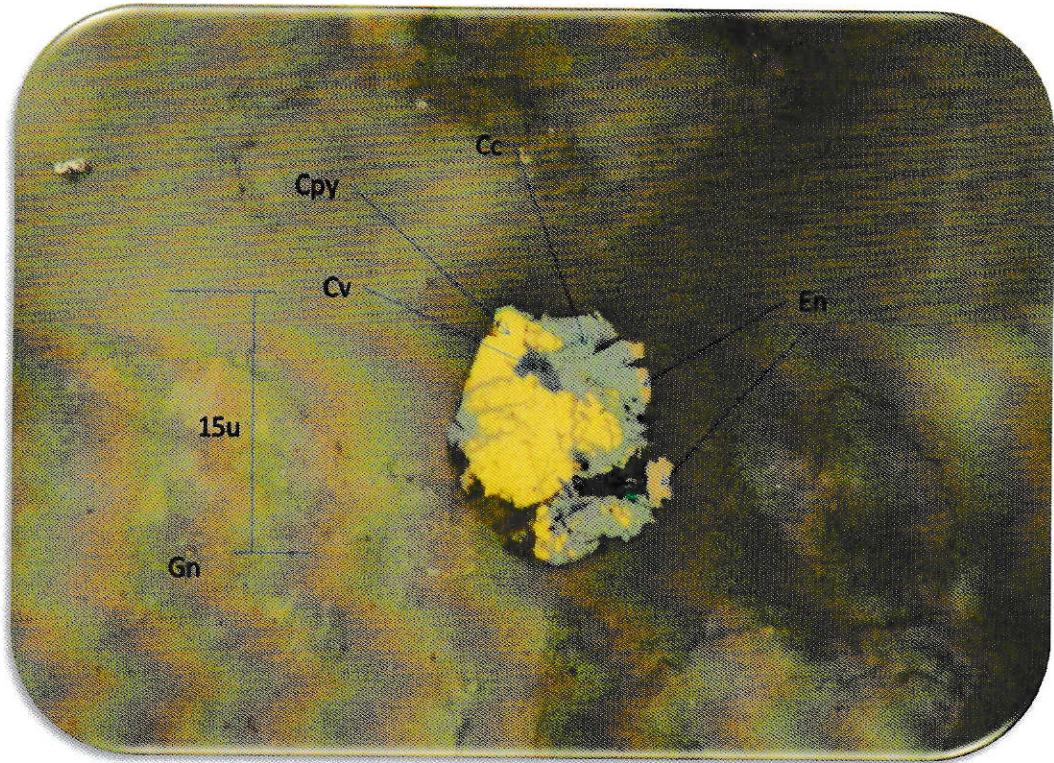


Figura 52. Presencia de calcopirita, covalina, calcosina y trazas de enargita en ganga de 15 micrones.

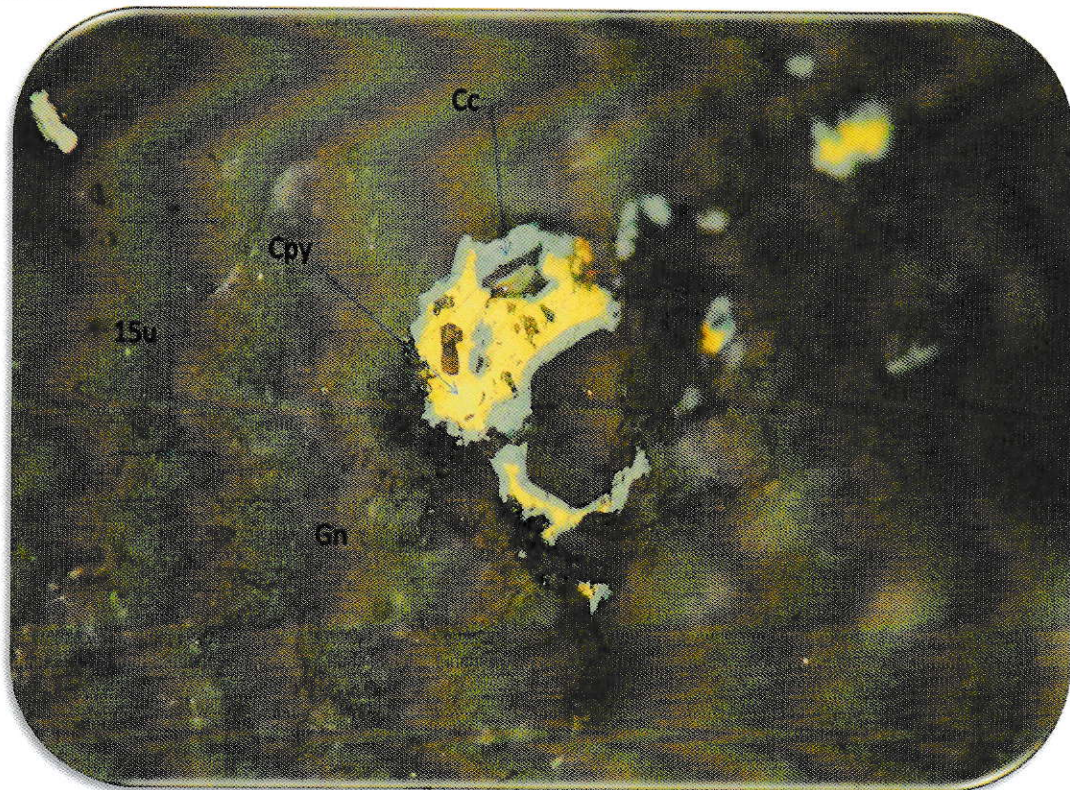


Figura 53. Presencia de calcopirita y calcosina en ganga de 15 micrones.

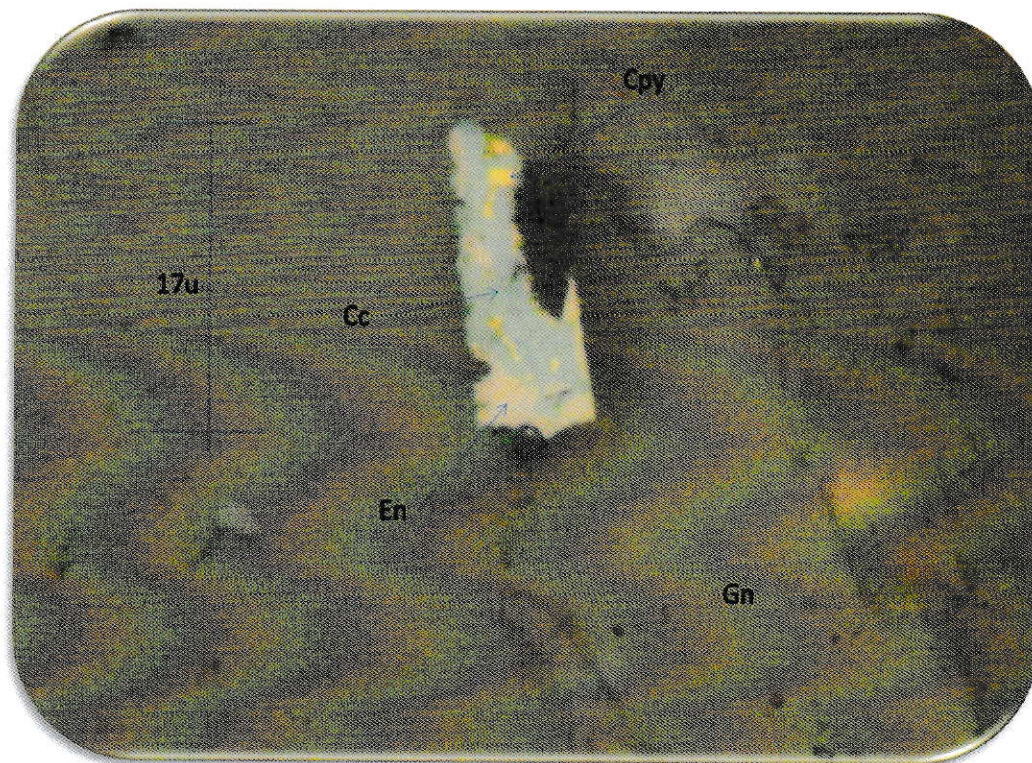


Figura 54. Presencia de calcopirita, calcosina y trazas de enargita en ganga de 17 micrones.

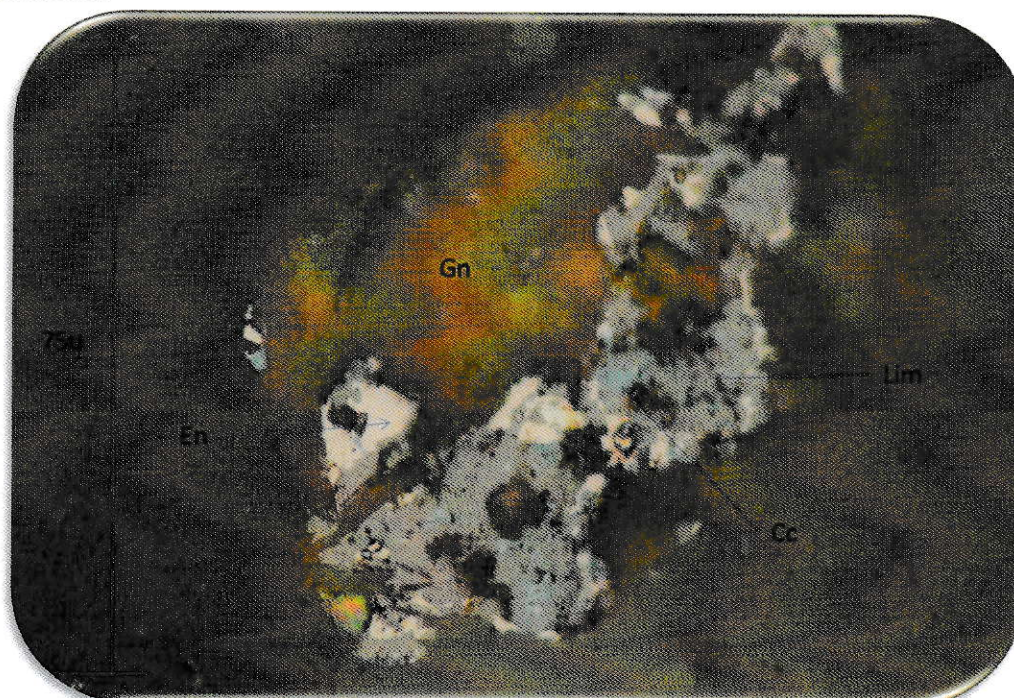


Figura 55. Presencia de calcosina y trazas de limonita y enargita en ganga de 75 micrones.

3.2.4. Análisis químico

A continuación se presentan los resultados del análisis químico de las arenas muestreadas (ver punto 2.10.):

Tabla 10. Resultados de análisis químico, leyes de CuT, Cu Sol, Fe, Mo y As.

N° de Muestra	Flujos	CuT %	Mo %	Cu Sol %	Fe %	As ppm
806424	Playa lamas muestra 12	0,088	0,007	0,019	2,53	6
806426	S1-B 2° cuarteo muestra 4	0,087	0,008	0,016	2,53	7
806427	S3 2°cuarteo muestra 10	0,120	0,005	0,018	2,87	9
806428	S3 1° cuarteo muestra 9	0,131	0,005	0,018	2,77	8
806429	Playa lamas muestra 11	0,074	0,006	0,015	2,86	4
806430	S1-A 1° cuarteo muestra 1	0,106	0,006	0,019	3,01	9
806431	S2-A 1° cuarteo muestra 5	0,138	0,01	0,021	2,33	9
806432	S1-A 2° cuarteo muestra 2	0,135	0,005	0,034	3,14	11
806433	S2-B 1° cuarteo muestra 7	0,115	0,005	0,019	2,35	6
806434	S2-A 2° cuarteo muestra 6	0,136	0,005	0,02	3,05	6
806435	S2-B 2° cuarteo muestra 8	0,117	0,004	0,021	3,45	12
806436	S1-B 1° cuarteo muestra 3	0,086	0,006	0,017	2,08	5

Se observan bajos valores en CuT, Cu Sol y Mo. Propio del proceso minero, en condiciones ideales, no debiera encontrarse leyes muy altas de CuT, Cu Sol o Mo. Éste análisis se ocupa para saber en gran medida si es que el proceso de extracción se encuentra en buenas condiciones operacionales. Las muestras indican que no se está perdiendo ninguno de ambos metales en los relaves. En promedio se encuentra un 0,11% de CuT, 0,006% de Mo y un 0,019% de Cu Sol.

En concordancia con el análisis microscópico, se encuentran leyes mayores para el hierro, debido a la alta presencia de minerales asociados a este metal. En promedio se

encuentra un 2,75% de Fe, considerando que la muestra representa un 5% de la mineralogía, se puede decir que un 55% lo representan minerales de hierro.

Con respecto al contenido de arsénico en las arenas los valores son bajos, debido a que prácticamente como se observó en el análisis microscópico, minerales asociados al arsénico se encuentran a nivel de trazas. En promedio se encuentran 7,6 ppm de arsénico. Con un valor máximo de 12 ppm en la muestra N°8.

3.2. Evaluación del efecto eólico en el Tranque de relave las Tórtolas

A continuación se realiza un estudio sobre la erosión eólica en tranques de relave, la investigación consistió en medir intensidades del viento en una zona definida del talud del tranque, incorporando la interacción entre los dos factores más determinantes en la erosión eólica, el viento y el suelo, con el fin de estructurar el perfil de velocidad de viento que afecte al lugar más desfavorable desde el punto de vista erosivo.

3.2.1. Erosión eólica en Tranques de relaves

En el proceso de la erosión eólica, el viento está gobernado por el comportamiento de la circulación atmosférica. La estructura de la dinámica atmosférica, nombre que se designa al estudio de estos factores, viene dada, entre otras, por la presión atmosférica, el viento, las influencias friccionales, los frentes y masas de aire. En general la erosión eólica, y por ende la acción del viento, se desarrolla en un mayor grado en los climas desérticos, los cuales se caracterizan por una alta radiación y estabilidad atmosférica.

Algunos factores se muestran a continuación:

La Radiación solar como principal motor de la dinámica atmosférica (intercambios térmicos) es la que generalmente determina la capacidad de ventilación, intensifica o debilita el viento y define su dirección y turbulencia, haciendo crecer o decrecer la capa de mezcla. A la vez, la temperatura, condiciona la intensidad del viento. Para mayor información de este factor, en el Anexo C se estudia el comportamiento de las máximas velocidades del viento en el Tranque con las temperaturas máximas, mínimas y promedio de algunos años representativos.

La estabilidad atmosférica, variable meteorológica que entrega el factor de estratificación o turbulencia que posee la atmósfera. Además es muy importante conocer la dirección del viento, la cual se define como el punto o región del horizonte de donde proviene y se representa mediante rosas de viento. Para mayor información de este factor, en el Anexo C se muestran las rosas de viento mensual del año 2005 en el Tranque.

La velocidad del viento no es matemáticamente constante en dirección ni intensidad. Casi siempre experimenta fluctuaciones que se suceden con intervalos cortos de pocos segundos. De acuerdo a su movimiento o flujo se pueden distinguir dos tipos de viento: laminar o turbulento. En el viento laminar, las partículas de aire se desplazan en forma paralela a la superficie terrestre, de manera que la velocidad y dirección permanecen constantes por largo tiempo, y en el caso del viento turbulento, las partículas de aire adoptan trayectorias desordenadas o turbulentas de carácter helicoidal, en donde sí aparece la componente vertical debido a las siguientes causas: desviación del viento por la forma del relieve y presencia de obstáculos (turbulencia mecánica), y movimiento de las masas de aire debido a las diferencias de

temperatura (turbulencia térmica). El flujo de aire turbulento es el que produce erosión.

El viento sólo adquiere naturaleza de agente de erosión cuando alcanza y supera cierta velocidad y encuentra obstáculos a los que puede mover. La velocidad media del viento aumenta exponencialmente con la altura sobre la superficie (Fig. 56). Ésta altura que depende de rasgos de desigualdad superficial del suelo (como la vegetación), se le conoce con el nombre de altura de desplazamiento cero, donde el aire se encuentra en calma o en movimiento lento. La velocidad del viento se ve afectada por la rugosidad total del suelo, donde se le denomina velocidad cero del viento a aquella que se encuentra sobre una altura k sobre la superficie, cuyo valor aumenta con la rugosidad.

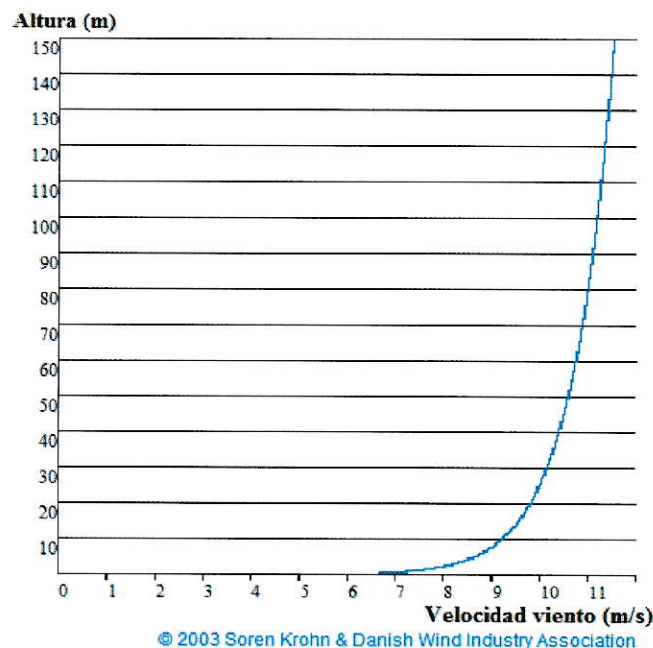


Figura 56. Representación de un perfil de viento, correspondiente a la velocidad del viento en función de la altura.

La expresión matemática de la variación de la velocidad del viento con la altura se denomina ley de cortadura de viento, las leyes de cortadura comúnmente empleadas

son la ley logarítmica y la ley potencial, ambas permiten obtener la representación del perfil de viento en la capa superficial.

La ley potencial obtenida de la Norma Chilena 432 Of. 71, utilizada para el cálculo de la acción del viento sobre las construcciones la que queda definida por la expresión:

$$V_z = Vz_{ref} \left[\frac{z}{z_{ref}} \right]^p \quad (1)$$

Siendo:

V_z : velocidad promedio del viento a cualquiera altura z ,

V_{zref} : velocidad promedio del viento en altura z_{ref} ,

z : altura a la que se mide la velocidad v_z ,

z_{ref} : altura hasta donde se manifiesta la influencia del rozamiento,

p : exponente cuyo valor depende de la rugosidad del suelo.

Utilizando esta ecuación y asumiendo la presión básica de viento según la NCh 432 Of. 71, la que está especificada para todo tipo de obras civiles, se puede determinar las velocidades a diferentes alturas.

Para la determinación del exponente p existen dos criterios fundamentales. El primero fue desarrollado por Justus y Mikhail, para un valor de rugosidad z_0 entre 0,01 cm y 0,5 cm, que es aplicable a las arenas de relave y se establece en la siguiente expresión:

$$p = \frac{(0,37 - 0,088 \ln[Vz_{ref}])}{\left(1 - 0,088 \ln \left[\frac{Z_{ref}}{10} \right] \right)} \quad (2)$$

El segundo criterio, adopta directamente $p = 1/7 = 0,142$ y es aplicable a sitios de poca rugosidad. Dependiendo de la categoría de estabilidad atmosférica del área donde sopla el viento y si es una superficie urbana o rural, se pueden asignar diferentes valores al exponente p , según Pasquill, existen seis categorías de estabilidad (ver Tabla 51). Cuando no existen instrumentos para medir en forma directa la velocidad del viento, se puede recurrir a la escala Beafort (ver Tabla 52).

Los factores climáticos como precipitación, temperatura, humedad atmosférica y vientos tienen una influencia central en la generación y desarrollo de los procesos de erosión eólica. A mayores precipitaciones y contenidos de humedad, el suelo es más resistente a las voladuras, mientras que las elevadas temperaturas, la baja humedad del aire y los vientos fuertes influyen en la evapotranspiración determinando la pérdida del agua edáfica.

Dentro de los factores que afectan la magnitud de la erosión eólica, que servirá de referencia para posteriormente desglosar y determinar los factores más incidentes que afectan a los tranque de arenas de relaves, se cuentan la aridez del clima, la velocidad del viento, la estructura y textura del suelo, rugosidad de la superficie del suelo y la vegetación.

Con respecto a la estructura y textura del suelo, se tiene que la arena arcillosa, rica en partículas de tamaño entre 10 y 100 micras, es el suelo más vulnerable (Bagnold, 1941), mientras más arcilloso es el suelo es mucho más cohesivo, de buena estructura y por lo tanto más resistente. Las rocas, arenas o areniscas también son más

resistentes, puesto que las partículas son demasiado pesadas para ser arrastradas por el viento. La erosionabilidad del suelo por causa de los vientos está relacionada con la textura y su estabilidad estructural, los suelos de textura gruesa son más susceptibles a erosionarse. El tamaño óptimo que deben tener las partículas para ser erosionadas es aproximadamente 80 micras (aproximadamente malla #200 ASTM). La velocidad del viento se reduce al aumentar la rugosidad de la superficie del suelo, disminuyendo la posibilidad de traslación de las partículas. La Tabla 17 muestra diferentes valores de longitud de rugosidad, z_0 , siendo la arena la con el menor valor, entre 0,01-0,1.

La extensión del terreno afectada es otro factor importante, ya que al tener un área determinada orientada en el sentido de la dirección del viento, se producirá erosión eólica cuya intensidad aumenta a lo largo de la dirección del viento. Donde, mayor longitud de terreno, mayor erosión.

Otra causa principal es la cubierta vegetal disminuida o ausente, como es el caso de las regiones áridas y semiáridas.. La vegetación actúa como una capa protectora o amortiguadora entre la atmósfera y el suelo, gracias a componentes como hojas y tallos, sistemas radiculares y materia orgánica. La humedad de la tierra aumenta la cohesión entre partículas, lo que se conoce comúnmente como cohesión aparente, por tanto, la velocidad del viento debe ejercer una fuerza que exceda a estas fuerzas peliculares para producir el movimiento de las partículas. Otro factor que influye son las características físicas de la superficie terrestre, denominadas rasgos del terreno o topografía. Los rasgos topográficos pueden afectar la atmósfera de dos maneras, térmica y geoméricamente. La turbulencia térmica se produce cuando los objetos

emiten distintas tasas de calor. Por ejemplo, un área verde no tiene la misma capacidad de absorción que un muro de arenas en Tranques, por tanto liberará más calor. La turbulencia mecánica (geométrica) es causada por el viento que fluye sobre objetos de tamaños y formas diferentes.

3.2.2. La actividad morfogenética del viento

La actividad morfogenética del viento, es decir su capacidad para alterar el relieve, está influenciada por el flujo de aire turbulento, donde la velocidad es más importante que la frecuencia. La eficacia de la acción eólica se limita a las partículas de menor tamaño que no se mantienen en suspensión durante mucho tiempo, pues las partículas que sí puede mantener en suspensión durante mucho tiempo tienen un escaso poder erosivo.

La incorporación de una partícula a una corriente de aire se produce como resultante de tres fuerzas (ver Fig. 57):

- Gravedad debido a la masa del grano (a).
- Empuje o tracción, producida por el viento (b).
- Succión, producida por descompresión de la masa de aire - en la parte opuesta a la acción del viento y esta descompresión genera una fuerza con una dirección de 45 grados (c).

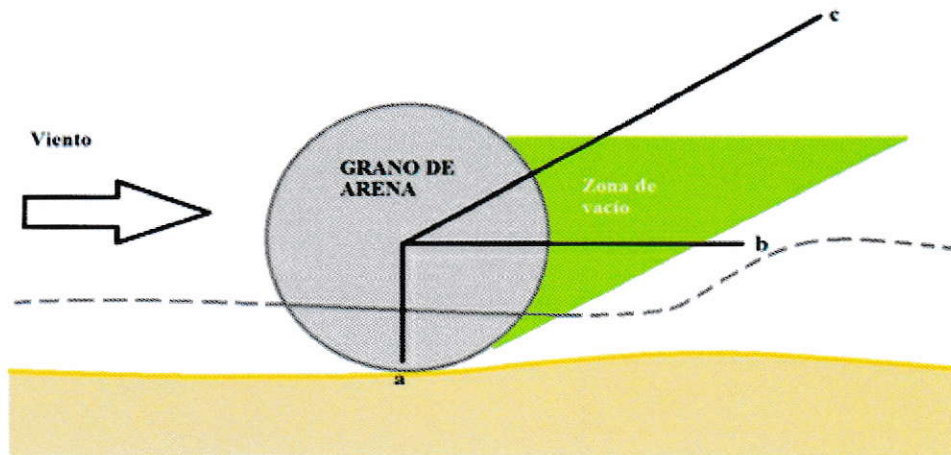


Figura 57. Incorporación de una partícula a una corriente de aire.

La actividad morfogénica del viento procede de la energía que produce, y aunque parte de ella se disipa en forma de calor, es suficiente para realizar el accionamiento, transporte y acumulación del suelo.

El accionamiento, dependerá de la naturaleza de los suelos expuestos a la ablación. Este término con el que se define el arrastre de material causado por el aire, se puede producir a partir de dos fenómenos la deflación o la abrasión. La deflación consiste en un desplazamiento individual de las partículas, ataca a superficies alteradas y secas actuando hasta que la saturación del viento provoca su bloqueo. Cuando la superficie atacada presenta fragmentos movilizables se excavan cubetas y depresiones cerradas y amplias, que en medios áridos pueden ser muy grandes. La abrasión eólica es ejercida por vientos muy violentos y cargados de grandes cantidades de material abrasivo. La eficacia de la erosión depende de la densidad y de la velocidad del fluido. Un fluido es más denso cuantos más materiales lleva en suspensión y más eficaz cuanto menos vegetación exista.

El transporte de las partículas se lleva a cabo mediante los **movimientos de suspensión, saltación y arrastre superficial** (ver Fig. 58). En el primero de estos las partículas de suelo cuyo diámetro sea inferior a 0,05 mm, correspondiente a material fino y polvo, entran en la corriente de aire cuando el suelo es golpeado por partículas que se mueven por saltación, siendo elevadas al aire, debido a las corrientes ascendentes y transportadas más o menos paralelas con la dirección del viento. El movimiento por saltación es causado por la presión del viento contra las partículas del suelo y la colisión de éstas sobre otras partículas, y depende en mayor grado de las velocidades del viento y en menor grado de la fuerza con que éste ejerce sobre la superficie del terreno. Esta forma de transporte según Richard W. Stephenson, que planteó la utilización del modelo de Bagnol para determinar la velocidad umbral en los relaves, se da principalmente en partículas comprendidas entre 0,05 mm a 0,5 mm de diámetro. El movimiento de arrastre superficial es causado por la energía derivada de granos más pequeños que descienden y golpean en saltación a granos de mayor tamaño, siendo mucho menor el porcentaje de partículas que se mueven por arrastre superficial, que el de las que avanza por saltación. El transporte superficial o rodamiento se presenta en tamaños comprendidos entre 0,5 mm y 1 mm.

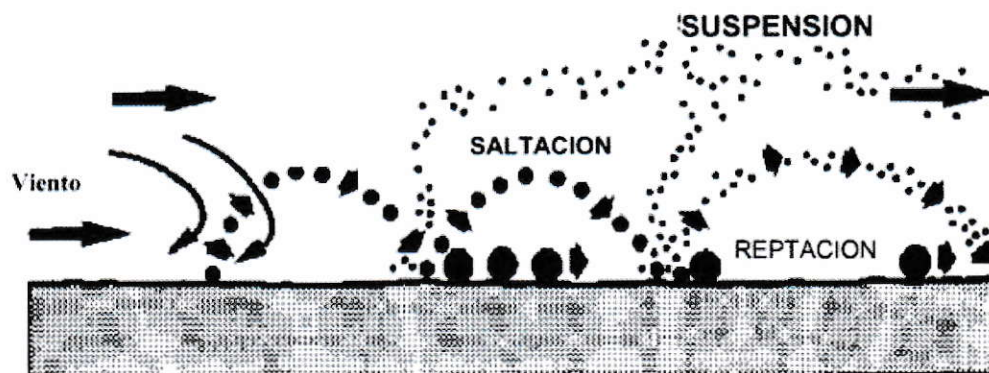


Figura 58. Secuencia de erosión eólica.

La movilización de las arenas y los polvos no se produce más que a partir de una velocidad del viento crítica, que depende de la magnitud y la densidad de la carga del fluido. Afecta primero a las partículas de menor tamaño para ir movilizándolo, progresivamente, las más grandes. El flujo eólico es muy grande por lo que se distinguen, dos flujos superpuestos, un flujo superior, más rápido, lineal y que desplaza cargas de pequeño calibre como limos y arcillas, y un flujo inferior, más lento y turbulento, que desplaza una carga de mayor calibre, es decir, arenas. De esta forma, se deduce que se necesita un aumento en la velocidad del viento para transportar partículas de mayor diámetro.

En la Tabla 11 se presenta en forma aproximada rangos de velocidades de viento requeridas para remover diferentes tipos de partículas de acuerdo al tamaño. El transporte en altura está alimentado por las turbulencias ascendentes que aspiran las partículas superficiales y las mantienen en suspensión. El transporte a ras de suelo resulta de la acción directa del viento, sobre las partículas más pesadas, que no se pueden levantar. Los desplazamientos son cortos y se realizan por saltación o rodamiento, y más raramente por suspensión. Esta forma de transporte es muy lenta, ya que normalmente el viento no sopla con suficiente fuerza.

Tabla 11. Relación entre el tamaño de las partículas y la velocidad necesaria para lograr su movimiento.

Partículas	Diámetro (mm)	Velocidad viento (m/s)
Limo	0,05-0,01	0,1-0,05
Arena Fina	0,1-0,5	1-15
Arena Media	0,5-1	45,83-60
Arena Gruesa	1	100-120

La velocidad umbral de fluido o velocidad crítica, es la velocidad mínima para que la partícula produzca el fenómeno de saltación o movilización, es decir, para el levantamiento de las partículas. (Bagnold, R.A, 1941) desarrolló una ecuación matemática, que corregida por la humedad, tiene la siguiente forma:

$$V_t = A \left[g d \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \right]^{0.5} (1,8 + 0,6 \log w) \quad (3)$$

Donde;

V_t : velocidad umbral de fluido,

A : coeficiente empírico de turbulencia, que relaciona la rugosidad del material y tipo de fluido ($\approx 0,1$)

ρ_s : densidad de la partícula

ρ : densidad del aire (0,00122 kg/L)

g : aceleración de gravedad (9,8 m/s²)

d : diámetro de la partícula

w : humedad de la partícula en porcentaje

Una vez iniciado el movimiento de la arena, se puede mantener con velocidades de viento menores que la velocidad umbral de fluido, ya que el impacto de las partículas en saltación contra aquellas que se hallan en la superficie aportan energía adicional para mantener la saltación; de esta forma aparece la velocidad umbral de impacto definida como la velocidad necesaria para mantener el proceso de saltación.

Tanto la velocidad umbral de fluido como la velocidad umbral de impacto tienen una relación directa con el tamaño de la partícula, a mayor diámetro del grano, se requiere mayor velocidad del viento para moverla.

Las curvas construidas por Bagnold, correlacionan la velocidad umbral del fluido y la velocidad umbral de impacto en función del tamaño del material (ver Fig. 59), que aparecen en el gráfico, en el eje de la ordenada como drag velocity, y threshold wind velocity respectivamente, las cuales son necesarias para generar el movimiento de la partícula; relacionando también las velocidades del viento a una pequeña altura sobre la superficie en el momento en que se genera el movimiento de la partícula. De acuerdo al tamaño, y los tipo de formaciones como dunas, loes, etc., se muestran los distintos tipos de movimiento del material por acción del viento. Se observa (Fig. 61), que a medida que aumenta el tamaño de la partícula se requieren velocidades umbrales de fluido e impacto del viento mayores.

Posteriormente, cuando el viento cesa o desciende por debajo de la velocidad necesaria para el transporte de la carga, esta se deposita en el suelo generando su acumulación. El material rodante o el de saltación termina alojado en huecos u obstáculos del terreno. El material en suspensión decanta lentamente, es decir las partículas caen por gravedad, primero las más pesadas y luego las más ligeras, estructurando el calibre de los depósitos. La decantación puede acelerarse si el aire es húmedo, ya que el polvo puede absorber agua, particularmente si está compuesto de partículas higrófilas.

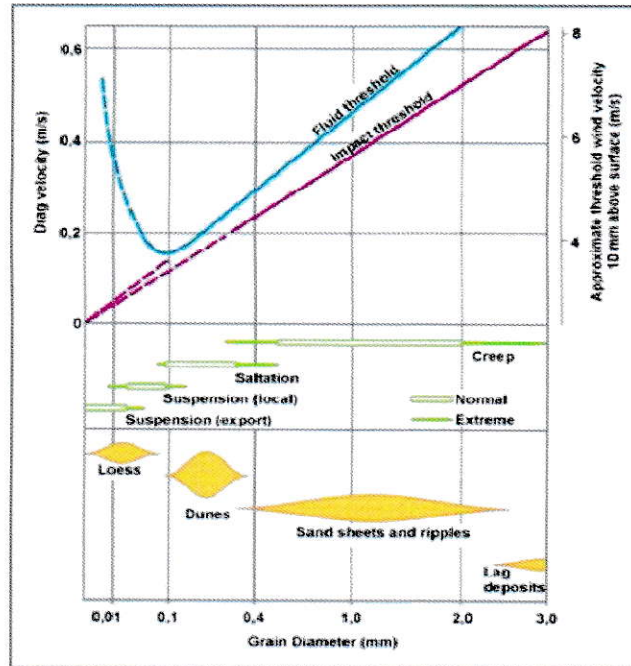


Figura 59. Relación entre tamaño del grano, velocidad umbral de fluido y velocidad umbral de impacto. Fuente: Jaramillo, I. Miranda, A., 2003.

La deposición producida por el viento está particularmente estructurada, de tal manera que siempre se depositan primero las partículas más pesadas y luego las más ligeras. Además las partículas ligeras vuelven a ser levantadas, de manera que al caer de nuevo, su lugar ha sido ocupado por partículas más pesadas, lo que provoca una similitud de granulometría en los depósitos eólicos. Pero también es una característica de estos depósitos la estructura cruzada, debido a la variabilidad de las direcciones del viento y a la inclinación de las pendientes.

3.2.3. Determinación del perfil de velocidad del viento en Tranques de relave.

En los Tranques de relave, la erosión eólica corresponde a la pérdida del material producto del arrastre de las partículas debido a la acción del viento. A medida que el tranque va creciendo en la etapa de operación, la altura del muro, aumenta al igual que la acción del viento sobre éste, llegando un instante en que se generan problemas

de enorme importancia que pueden afectar la operación, la estabilidad del muro resistente, y el medio ambiente. La pérdida de material producto de la erosión eólica genera una disminución de la masa que constituye el talud del tranque, que se manifiesta en forma de cárcavas, generando zonas potenciales de falla, afectando la estabilidad del muro del tranque (Fig. 60). La incidencia directa del viento en el talud, provoca que el material en la zona superficial sea removido, dejándolo en estado suelto, y al momento de depositar una nueva capa compactada sobre la capa suelta, es posible la aparición de un plano de falla. A todo esto se suma la disminución de la revancha entre las lamas y el borde superior del muro, por la pérdida de material, lo que se favorece un rebalse de las lamas ante cualquier evento lluvioso o sísmico. También se pueden apreciar otros problemas de relevancia como discontinuidad en el avance de la depositación de relaves y por ende de la construcción del muro debido a la reparación de los surcos creados por la acción del viento lo que involucra pérdidas económicas y de tiempo. Otro problema de tipo operacional corresponde al deterioro parcial o total del coronamiento impidiendo el tránsito de vehículos y maquinarias alrededor y por el muro del tranque.

Las emisiones de partículas finas de relave pueden viajar grandes distancias afectando áreas adyacentes y zonas pobladas. En estos casos los efectos pueden ser más severos, si se considera que las emisiones de material contienen elementos que afectan las vías respiratorias de los seres humanos. El problema de las emisiones de material particulado es considerado uno de los impactos ambientales más importantes de los tranques de arenas de relave.



Figura 60. Fotografía de Cárcava en el muro.

3.2.4. Obtención de los perfiles de viento.

Se determinaron los valores de velocidades máximas diarias de todas las mediciones realizadas, se determinó la desviación estándar y el promedio de las velocidades máximas en las tres alturas definidas. Se eliminaron aquellos valores de velocidades máximas que se alejaban del valor promedio un número mayor a la desviación estándar respectiva. Una vez hecha la selección de velocidades máximas, se obtuvo un nuevo promedio, cuyo resultado corresponde a la velocidad máxima promedio definitiva (ver Tabla 12).

Para determinar el perfil de viento se tomó como modelo el que se propone la NCh 432 of 71, ecuación (1). Se obtuvieron tres perfiles de viento teóricos en función de las velocidades máximas y las alturas de referencia (Tabla 12) y junto con ello el comportamiento teórico a los datos medidos in situ (Fig. 61). El aumento de la velocidad del viento en la zona del coronamiento se debe a la convergencia de las líneas de flujo causando una mayor erosión en el coronamiento y revancha del tranque.

Tabla 12. Velocidades máximas promedio definitivas.

	Coronamiento	2/3 Talud	Pies del Talud
Altura (m)	20,00	10,00	2,00
Velocidades máximas promedio (m/s)	11,12	9,21	6,34

Utilizando cada valor de velocidad máxima y altura correspondiente se determinó el valor del exponente p a través de la ecuación (2) en cada caso (Tabla 13). Con estos valores, se calculó el promedio del exponente p el cual corresponde a 0,171, valor que fue comparado con los publicados en la bibliografía, donde se observa gran similitud entre ellos (Tabla 14).

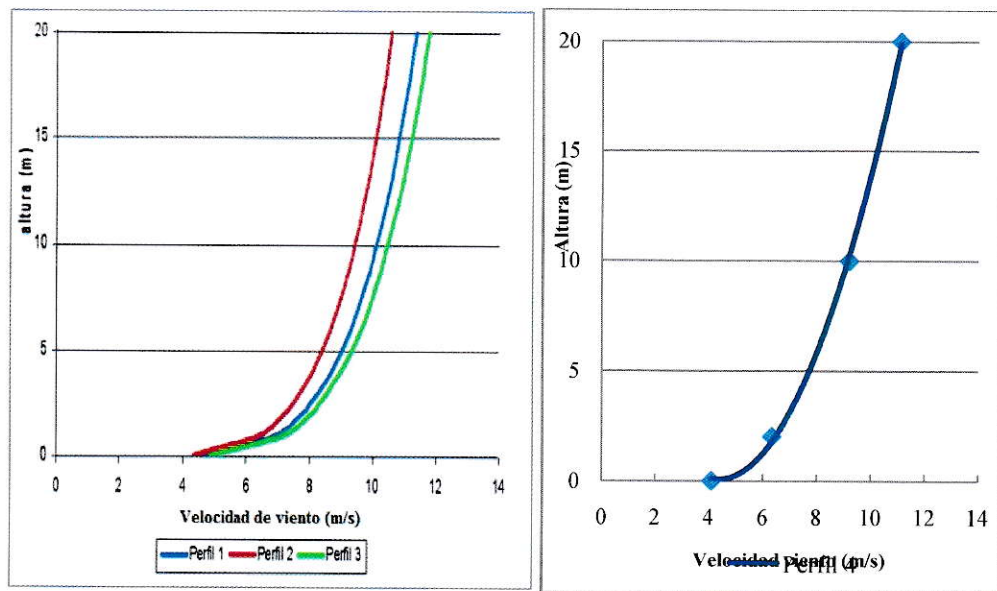


Figura 61. Perfil de variación de velocidad real del viento en el tranque con la altura.

Tabla 13. Valores del exponente p .

V_{zref} (m/s)	Z_{ref} (m)	p
11,12	20,00	0,168
9,21	10,00	0,174
6,34	2,00	0,181

Tabla 14. Comparación del exponente p in situ y bibliografía.

p promedio medido in situ en el tranque de relaves Las Tórtolas	0,171
Norma Chilena 432 of 71 (campo abierto y superficie del mar)	0,16
Manual de Marks (velocidades ente 8 - 56 (km/hr))	0,20

3.2.5. Determinación de la velocidad umbral de fluido.

La determinación de la velocidad umbral de fluido teórica se realizó utilizando el modelo de Bagnold modificado por humedad, ecuación (3), con los siguientes parámetros (ver Tabla 15).

Tabla 15. Parámetros para determinar la velocidad umbral de fluido.

Parámetro	Valor
ρ_s: densidad de la partícula	1,66 kg/L
d: diámetro de la partícula	$D_{90} = 0,45$ mm
w: humedad de la partícula en porcentaje	0,44

Por tanto;

$$V_t = 0,1 \left[9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 0,00045 \text{m} \times \left(\frac{1,66 \text{ kg/L} - 0,00122 \text{ kg/L}}{0,00122 \text{ kg/L}} \right)^{0,5} \right]^{(1,8 + 0,6 \log 0,44)}$$

$$V_t = 0,39 \text{ m/s}$$

La velocidad umbral de fluido teórica determinada es de 0,39 (m/s).

La arena de relave posee una densidad seca promedio superficial de 1,66 (gr/cm^3).

Reemplazado estos valores en la ecuación Bagnold modificada por humedad, se obtiene la ecuación (4) que define el comportamiento de tipo potencial entre el tamaño de partícula de relave en m y la velocidad umbral de fluido, para las arenas de relave que constituyen la zona del talud afectado.

$$y = 1,83 * d^{0,5} \text{ [m/s]} \quad (4)$$

El tamaño de partícula utilizado es de 0,00045 m, que corresponde al D90. La velocidad umbral de fluido teórica determinada es de 0,39 (m/s) (ver Fig. 62)

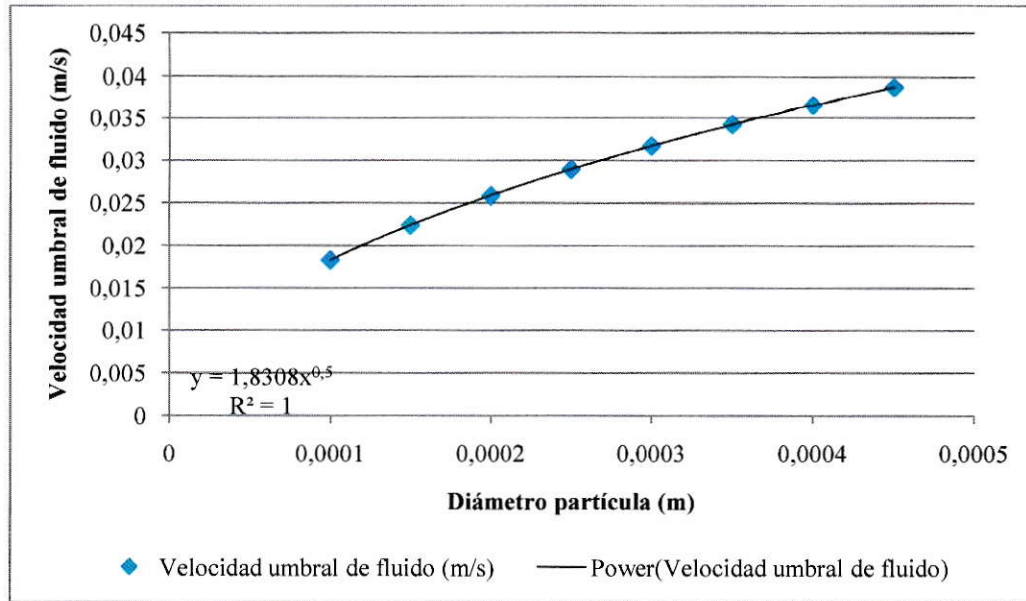


Figura 62. Velocidad umbral de fluido en función de los diámetros de la arena.

3.2.6. Determinación de la velocidad umbral de impacto.

Los datos recogidos en terreno se analizaron aplicando un análisis estadístico basado en medidas de tendencia central y variabilidad, lo que permitió filtrar los datos (Tabla 16). El promedio y la mediana fueron calculados una vez que se eliminaron los valores de velocidad umbral que se alejaban del valor promedio en un número mayor a la desviación estándar respectiva. La velocidad umbral de fluido in situ corresponde a 5,23 (m/s) el cual fue obtenido por mediciones en terreno a una altura de 5,00 cm sobre la superficie.

Tabla 16. Medidas de tendencia central y variabilidad de la velocidad umbral de impacto.

Desviación Estándar	0,61
Promedio de velocidades umbrales	5,23
Mediana de velocidades umbrales	5,20

3.2.7 Determinación de la altura de erosión.

Se verificó la similitud entre las velocidades teóricas entregadas por el modelo de viento y velocidades máximas promedio observadas in situ (Tabla. 17).

Tabla 17. Comparación de velocidades medidas in situ y teórica.

Velocidades medidas in situ (m/s)	Velocidades modelo Bagnold
5,23	4,8

Se eligió el perfil de viento en el cual la velocidad umbral se presentara a una altura coincidente con la altura en la que se manifiestan los problemas erosivos en el tranque. Los valores utilizados para determinar el perfil de viento en terreno, fueron obtenidos midiendo las velocidades de viento a 1,5 m sobre la superficie del talud, mientras que la velocidad umbral superficial de impacto fue medida en terreno o dada por el modelo Bagnold modificado por humedad y ajustado por el factor de correlación. Por lo tanto, ambos valores no son comparables de manera directa. Debido a esto se realizó una extrapolación de valores de velocidad umbral de impacto superficial a un perfil de viento a 1,5 m de altura, para lo cual se registraron mediciones de velocidad a 1,5 m de altura, al mismo tiempo que se produce la erosión superficial. Aplicando el mismo concepto de análisis estadístico con medidas de tendencia central y variabilidad, se filtraron los datos obteniendo los siguientes resultados (Tabla 18).

Tabla 18. Medidas de tendencia central y variabilidad de la velocidad de umbral de impacto a 1,5 m de altura.

Desviación Estándar	0,95
Promedio de velocidades umbrales a 1,5 m de altura	8,9
Mediana de velocidades umbrales a 1,5 m de altura	8,7

Respecto a los valores de velocidades umbrales de impacto y velocidades a los 1,5 m de altura medidos en la zona afectada del talud, se observa que existe similitud entre los valores referidos a cada tipo de velocidad. De los resultados se concluye que cuando en la superficie del talud se produce la velocidad umbral de 5,3 m/s que comienza a causar erosión, en ese mismo instante a la altura de 1,5 m respecto a la superficie se está dando una velocidad de viento de 8,9 m/s.

Se debe tener presente que los valores de velocidad umbral de impacto y velocidad correlacionada a 1,5 m de altura junto con los factores de correlación y extrapolación son propios para la realidad del tranque Las Tórtolas de acuerdo a las condiciones dadas.

Conociendo la velocidad umbral de impacto mediada in situ, es posible correlacionar la velocidad umbral de impacto a los 1,5 m, como se explicó anteriormente, la cual se puede ingresar al perfil vertical de viento de la zona de estudio y estimar la altura en que se inician los problemas de erosión.

El perfil de viento teórico utilizado es el siguiente, donde V es la velocidad respecto de la altura Z.

$$V = 9,21 \left(\frac{Z}{10} \right)^{0,171} \text{ (m/s)} \quad (5)$$

Al observar los datos (Tabla. 19), se aprecia que la variación porcentual de la velocidad medida a los 10 m de altura es 0%, lo que se debe a que en esta altura se presenta la velocidad real que es utilizada como referencia en la ecuación para construir el perfil. Además se ve que el resto de las variaciones se encuentran dentro de un rango aceptable tomando en cuenta que el viento es una variable compleja y cambiante en el tiempo y espacio.

Tabla 19. Velocidades reales y teóricas entregadas por el perfil de viento seleccionado.

Ubicación	Altura (m)	Velocidad real (m/s)	Velocidad teórica (m/s)	Variación porcentual
Pie Talud	2	7,34	6,99	4,76%
2/3 Talud	10	9,21	9,21	0%
Coronamiento	20	11,12	10,37	6,74%

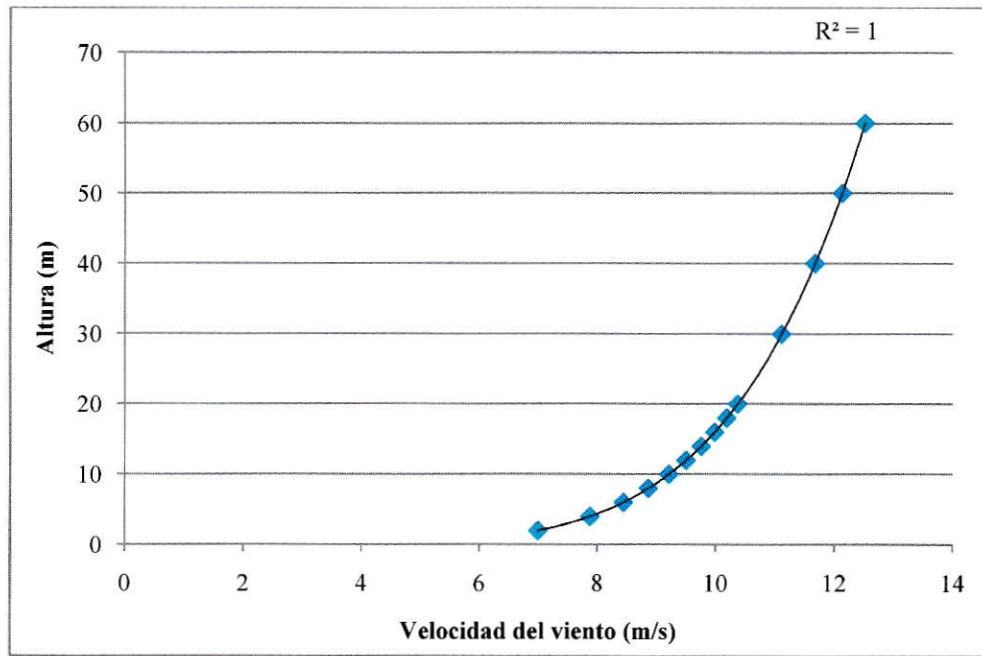


Figura 63. Perfil seleccionado velocidad v/s altura para el tranque Las Tórtolas.

Al evaluar la velocidad umbral de impacto medida a 1,5 m sobre la superficie (8,9 m/s) en la ecuación (5), se obtuvo que la altura a la que se produce esa velocidad es de 8,7 m. Para obtener la altura directa sobre la superficie del talud, es necesario restarle los 1,5 m correspondientes a la altura en la que se midió, con lo que quedó una altura de 7,2 m que es donde se estaría produciendo la velocidad umbral. Este último dato corresponde a la altura en que se comenzarían a producir problemas de erosión en base al levantamiento que se produce en esa altura. Se observó que el levantamiento de material ocurría un poco más arriba como a los 8,3 m de altura aproximadamente. Si se comparan los valores, se puede constatar que existe una buena aproximación considerando que sólo hay una variación de 13,253% (Fig. 63). Se puede hacer referencia a que a los 7,2 m se produce la velocidad umbral, pero el efecto erosivo del viento se debe dar con una velocidad mayor, lo que se producirá a mayor altura en el talud.

3.3.Trampas de saltación pasiva (Leatherman)

A continuación se muestran los resultados del muestreo de las trampas de Leatherman que permiten analizar y estudiar el comportamiento de las partículas que se transportan mediante saltación y arrastre.

Para cada sector muestreado se presenta la siguiente información, en tablas o gráficos:

- Coordenadas y posicionamiento de las trampas colocadas.
- Peso neto recolectado de cada una.

Las tablas se encuentran en el anexo B.

Se realiza un análisis por cada sector basado en la cantidad de material recolectado por las trampas, para esto se muestran sólo los gráficos de distribución de masa neta para mayor entendimiento.

Se presenta en la Fig. 64 el muestreo general de las trampas de saltación en los diferentes sectores del Muro y las correspondientes fechas de muestreo para la mayor comprensión del posicionamiento y comportamiento de las trampas.

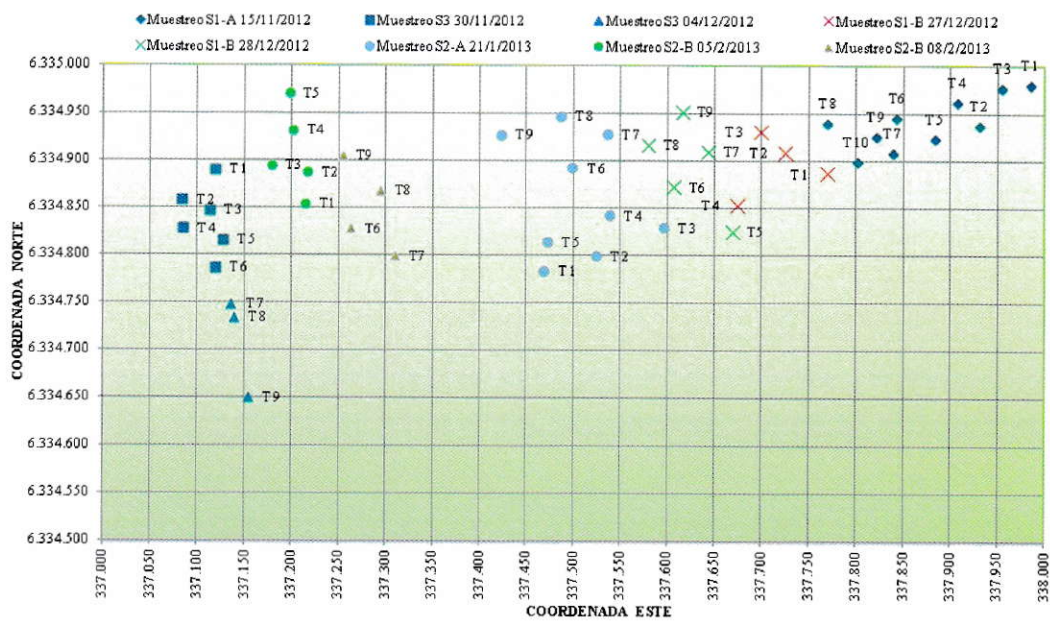


Figura 64. Muestreo general de trampas de arena, junto con la división de los sectores del Muro.

3.4. Discusión Trampas de Leatherman.

3.4.1. Sector 1-A

En el sector 1-A se observa un comportamiento normal y sin problemas de arrastre o saltación de material. En promedio se tiene 2,362 g por trampa, siendo la con mayor contenido en el muestreo la T8 con 5,173 g. Las trampas T1 y T2 cercanas a los pies del muro poseen los valores más pequeños de todo el muestreo. Ver Fig. 65.

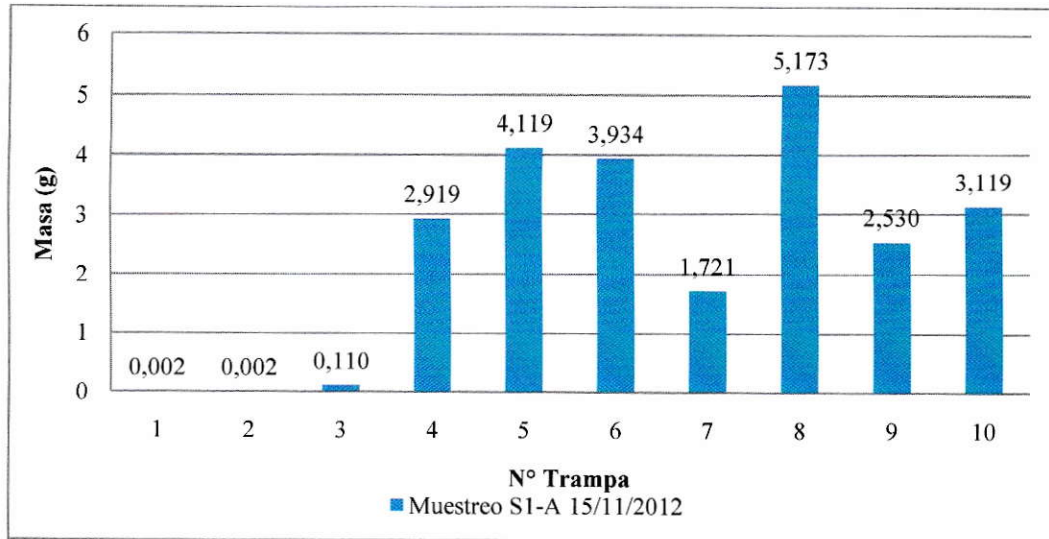


Figura 65. Distribución de masa de trampas en S1-A.

3.4.2. Sector 1-B

En el S1-B se observa un aumento de 287,638 g con respecto al S1-A, éste se encuentra un poco menos protegido por el cerro que el sector 1-A lo que explicaría un aumento de material arrastrado por el viento. Aun así se considera un sector sin problemas de erosión y levantamiento de material. El promedio por trampa es de 34,584 g y la trampa con mayor contenido de material fue la T8 con 122,265 g, la cual es la más cercana al sector siguiente (2-A) lo que explicaría el escape del promedio. Ver Fig. 66.

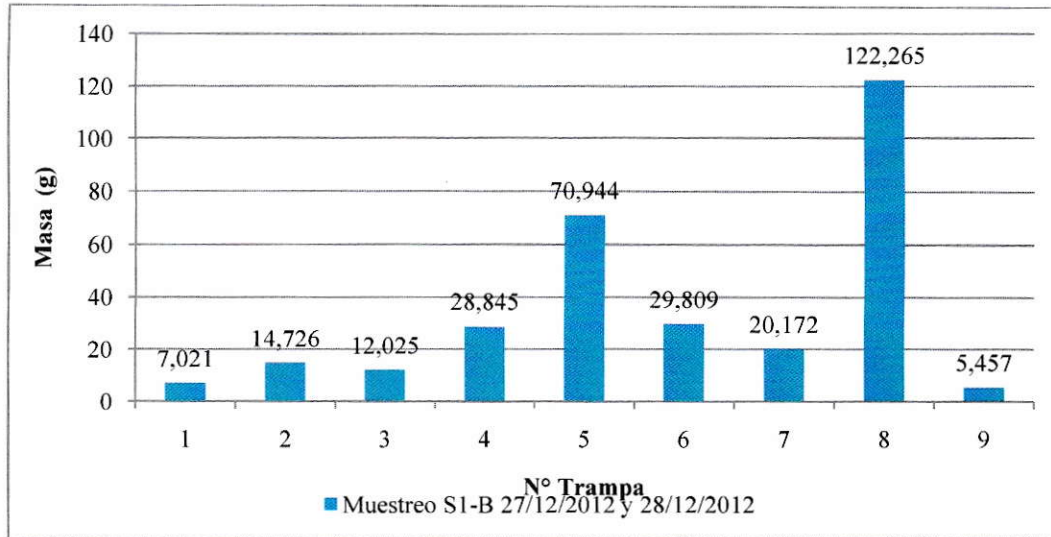


Figura 66. Distribución de masa de trampas en S1-B.

3.4.3. Sector 2-A

En el S2-A el promedio por trampa es de 84,532 g donde la máxima de masa lo posee la T6 con 185,344 g y el mínimo la T7 con 12,308 g. Las T6 y T8 que poseen los valores más altos están posicionadas cercanas a los pies del muro, lo que indicaría un aumento de levantamiento de material en esa zona, lo que lo producirían leves movimientos del viento. Ver Fig. 67.

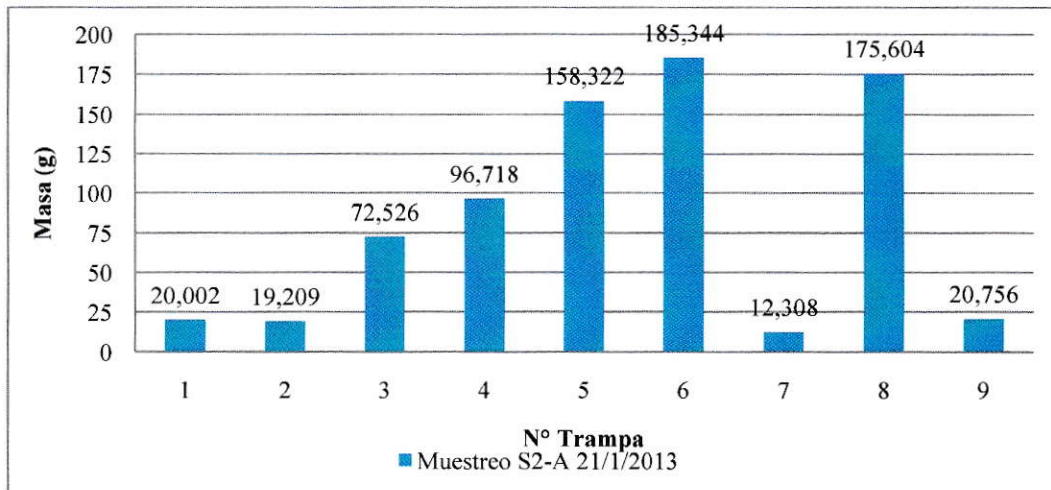


Figura 67. Distribución de masa de trampas en S2-A.

3.4.4. Sector 2-B

El S2-B se considera un sector más problemático que los anteriores. Las trampas T2, T3 y T4 forman un triángulo que representa la zona donde existe mayor levantamiento, la T4 posee 355,788 g siendo la trampa con mayor material recolectado, la T2 con 316,337 g y la T3 con 177,64 g (ver Fig.68). Esto se explicaría debido a que el viento de la tarde se direcciona pasando por esa zona (ver Fig. 72), aproximadamente después de las 19:00 horas. Las demás trampas poseen un rango entre 24,536-28,951g, a excepción de la T8.

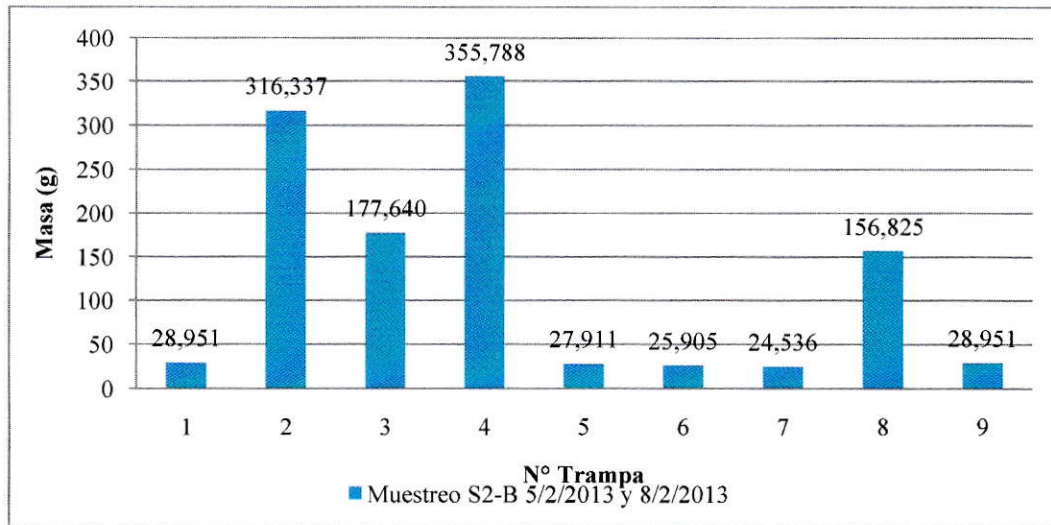


Figura 68. Distribución de masa de trampas en S2-B.

3.4.5. Sector 3

El S3 presenta los valores más altos, siendo el sector con mayor material recolectado. En la Fig. 70 se observa que a medida que se sube en altura los valores aumentan en proporción. Para las trampas T1, T2 y T3 posicionadas más cerca de los pies del Muro recolectan poco material, entre 16,551- 29,403g. En tanto, las trampas T4, T5 y T6 recolectan en promedio 284 g. En cambio, las últimas 3 trampas T7, T8 y T9 cambian sus valores ascendentes, siendo la T8 la que posee mayor material

recolectado de las tres con casi 1 kg de arena. La T7 posee aproximadamente $\frac{1}{2}$ kg y la T9 baja a niveles de 300g. Esto explica de forma muy gráfica que existe un levantamiento de las arenas que conforman este sector. Que los valores más altos se encuentren cerca del coronamiento revela que el primer levantamiento por saltación y arrastre se produce en esa zona, levantando material particulado suspendible que luego aumenta al ir bajando en altura del muro, produciendo una nube de material que se observa cuando existen valores altos de la velocidad del viento, principalmente en horas de la tarde. Esto se debe a que la dirección del viento SSE entra por la parte arriba del coronamiento desde la cubeta hacia el S3 levantando material en esa zona (Ver Fig. 70). El que exista una diferencia entre las trampas T7, T8 y T9 podría deberse al choque que produciría el viento en el cerro adyacente al sector provocando pequeños remolinos de vientos.

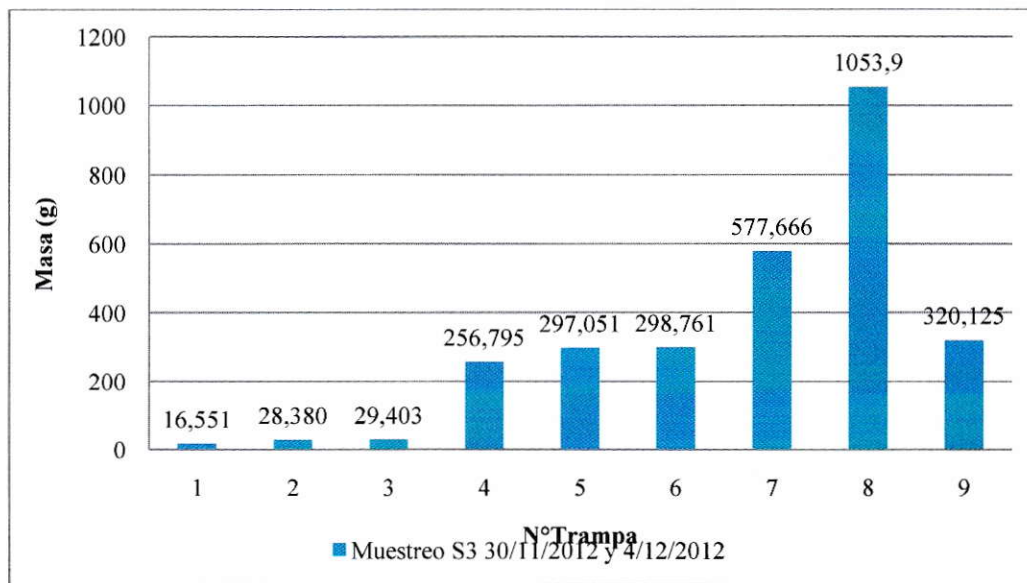


Figura 69. Distribución de masa de trampas en S3.

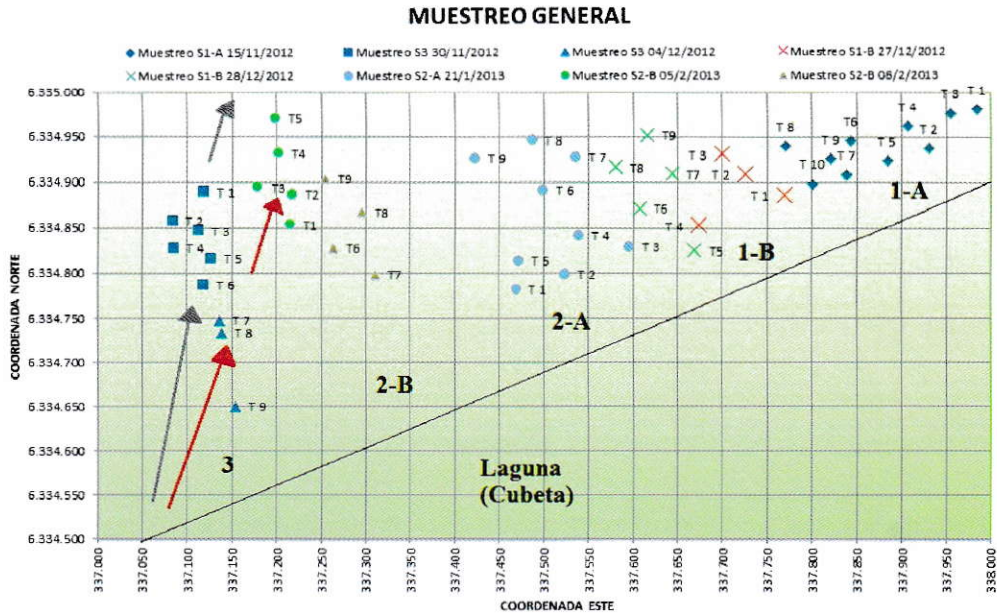


Figura 70. Demostración de la dirección del viento proveniente de la cubeta en diferentes horarios de la tarde. En gris se muestra la dirección aproximada del viento que comienza desde las 16:00 horas hasta las 19:00 horas. En rojo se muestra que cambia levemente la dirección del viento hacia el sector 2-B.

En la Tabla 20 se muestra la distribución de masa total (g) de las trampas de cada sector y en la Fig. 71 se grafica. Se observa que el aumento de material removido es de forma ascendente desde el S1-A al S3, siendo el S3 el que recolecta mayor cantidad de material.

Tabla 20. Masa Total del Muestreo en los diferentes sectores del Muro.

Sector	Cantidad de Trampas	Masa Total Muestreo (g)
1-A	10	23,629
1-B	9	311,267
2-A	9	760,789
2-B	9	1142,844
3	9	2878,635

*Una trampa del Sector 1-A es despreciable.

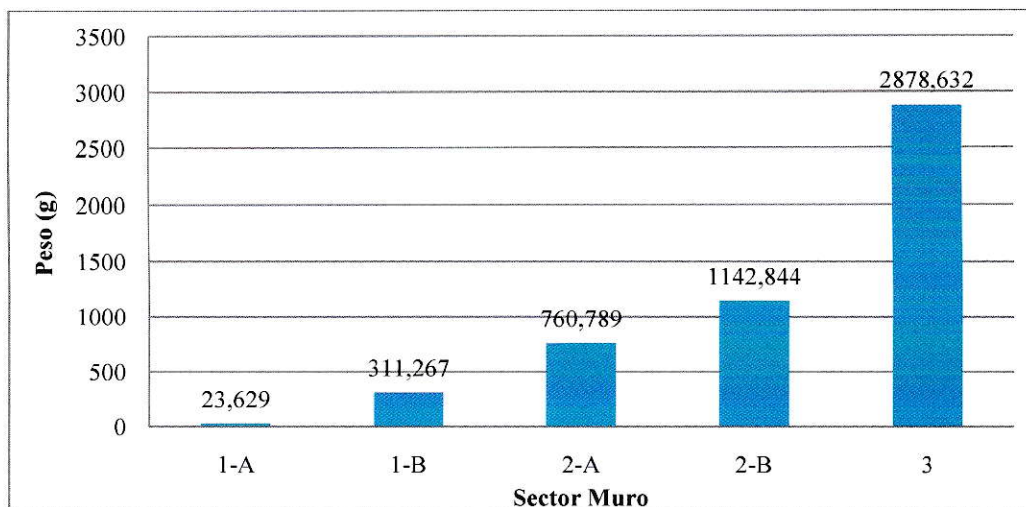


Figura 71. Distribución de masa total de las trampas en los diferentes sectores del muro.

3.6. Medición material particulado.

Los datos obtenidos de material particulado, incluyendo PST, PM_{10} , $PM_{2,5}$ y PM_1 se representan en gráficos de concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) v/s tiempo (hora). Además de tablas que proporcionan valores de moda, máxima, mínima y promedio de las mediciones. Toda esta información se encuentra adjuntada en el Anexo D.

3.7. Discusión material particulado

Para el presente análisis se muestran gráficos con promedios de PM_{10} de las diferentes mediciones, tanto en el muro como fuera de él. Debido a que las partículas suspendidas totales (PST), en este caso, lo compone principalmente el PM_{10} , se eligieron estos promedios para graficar el comportamiento general de las mediciones. Se realiza un análisis por sector, abarcando los valores de concentraciones de material particulado y los comportamientos más relevantes. Se hace referencia a tablas o algunos gráficos de concentración que son apreciables para la explicación de algún comportamiento.

3.7.1. Sector 1-A y Sector 1-B

Los sectores 1-B y 1-A se consideran como sectores sin problemas en levantamiento de material, tanto en la mañana como en las tardes se encuentran niveles muy bajos de PST, entre $108 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - $162 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esto se debe a que ambos sectores no se encuentran atacados por el viento proveniente de la cubeta y además poseen un cerro que los protege de cualquier viento proveniente de la dirección contraria.

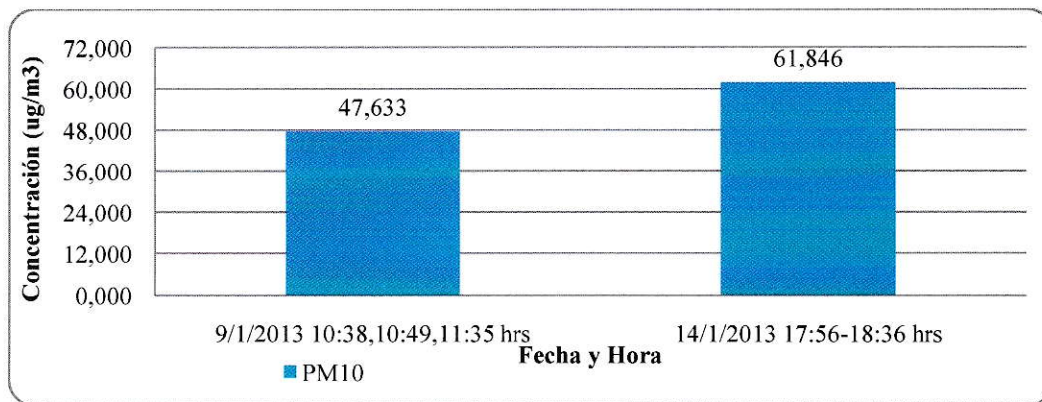


Figura 72. Promedios de PM₁₀ de mediciones en horario de la mañana y de tarde del S1-A.

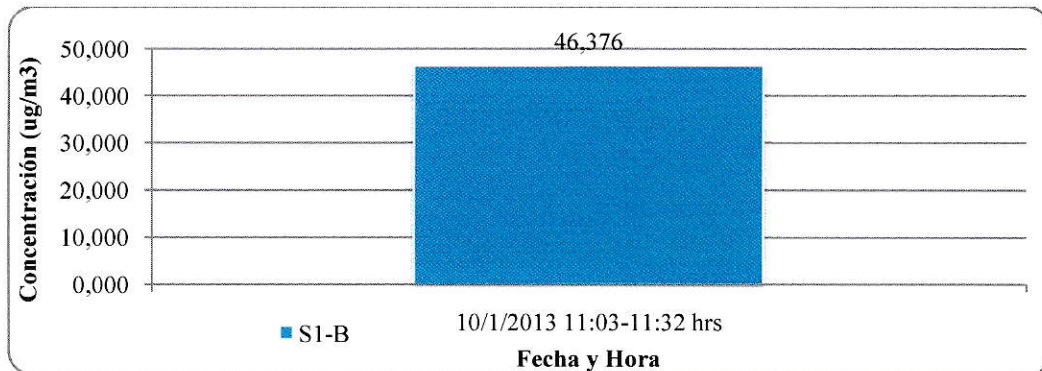


Figura 73. Promedio de PM₁₀ de medición en horario de la mañana del S1-B.

Los promedios de PM₁₀ en el S1-A reflejan las bajas concentraciones de material, tanto en la mañana como en la tarde, con concentraciones muy parecidas de $47,633 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $61,846 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ver Fig. 72) y también el S1-B muestra un promedio en la

mañana $46,376 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ver Fig. 73) casi idéntico al del S1-A, esto demuestra que ambos sectores no se encuentran afectados por la erosión eólica y se rigen por un comportamiento parecido.

3.7.2. Sector 2-A

En el S2-A se realizaron 5 mediciones en la mañana, las cuales arrojaron valores parecidos y homogéneos en el sector, con un promedio de PST de $170,087 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y promedios de PM_{10} de $92,025 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y para $\text{PM}_{2,5}$ de $19,705 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ver Tabla 36). Esto permite determinar al sector con un comportamiento homogéneo y en calma en horario de mañana. En las condiciones de la tarde el sector aumenta sus concentraciones a niveles de PST de $1203,645 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y niveles de $725,568 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} , los valores de $\text{PM}_{2,5}$ se mantienen bajos, en promedio $17,644 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ver Tabla 35). En relación a PM_1 se tiene concentraciones bajas tanto en la mañana como en la tarde (entre $2-4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio). La Fig. 74 grafica el comportamiento mostrando los promedios de PM_{10} .

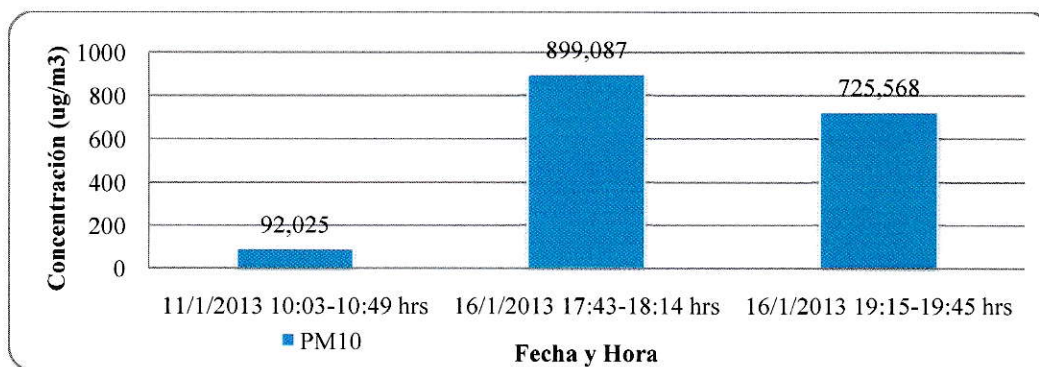


Figura 74. Promedios de PM_{10} de mediciones en diferentes horarios del S2-A.

3.7.3. Sector 2-B

En el S2-B se realizaron en total 2 mediciones, ambas en horario de la tarde.

El S2-B presenta al igual que el S3 niveles altos de material particulado llegando al igual que éste a valores de $6527,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como máximo de PST, pero con promedios más bajos que rondan en torno a $2800 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - $4700 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ver Tablas 37 y 38). Los valores de PM_{10} rondan los $2400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - $4400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ver Fig. 75). En relación a el $\text{PM}_{2,5}$ y PM_1 los valores son bajos, llegando a promedios máximos de $124,458 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $30,467 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Se observa gráficamente la influencia del viento en dirección al sector después de las 19:00 horas (ver Fig. 107), donde los niveles generales de material particulado incrementan, llegando a las máximas diarias del sector.

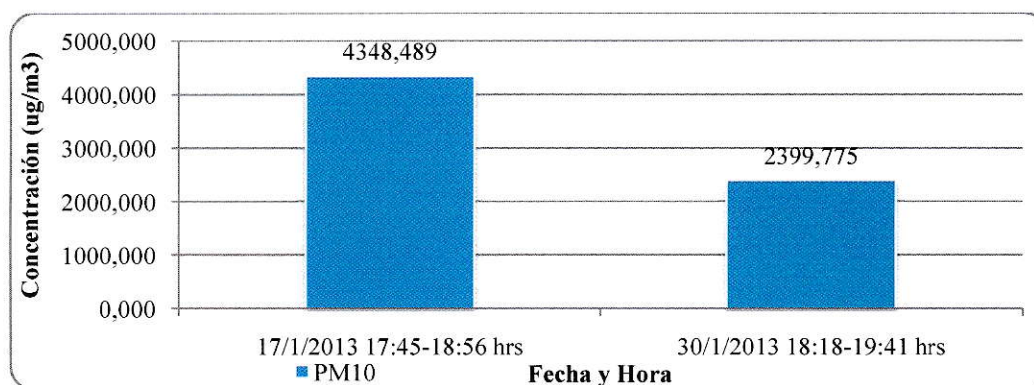


Figura 75. Promedios de PM_{10} en mediciones de horario de la tarde en S2-B.

3.7.4. Sector 3

En el S3 se realizaron en total 7 mediciones (2 en la mañana, una a inicios de la tarde y 4 en la tarde).

Mediante los gráficos se puede concluir que el S3 es el más comprometido al levantamiento de material particulado, teniendo los valores más altos del muestreo con una máxima concentración de PST de $6527,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y alcanzando promedios de $5404,313 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en condiciones de la tarde (ver Fig. 137 y Tabla 44).

En las mañanas el sector se encuentra en condiciones de calma, con valores de material particulado (PM_{10} , $PM_{2,5}$) bajo los $70,515 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $46,71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, con un comportamiento parejo y homogéneo (ver Tabla 41). Si se observa en la Tabla 36, a inicios de la tarde (14:00-15:30 pm) existe un alza en los niveles de material particulado llegando a $970,49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} , mientras que la parte fina mantiene sus niveles en $37,83 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En las tardes el sector muestra los niveles más altos del día (ver Fig. 76), llegando a niveles de promedio de PM_{10} de $5155 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el día 4 de Febrero de 2013 se observaron los niveles más altos de $PM_{2,5}$ con un promedio de $364,68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y una máxima de $615,96 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A la vez, en el mismo día se observan los valores más altos de PM_1 , con un promedio de $239,62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ver Fig. 137 y Tabla 44).

También se observó que el día 6 de Febrero de 2013 los niveles totales de material particulado bajaron ($567 \mu\text{g}/\text{m}^3$), producto posiblemente de las condiciones climáticas que se dieron en los días anteriores, días nublados e incluso un día de lluvia.

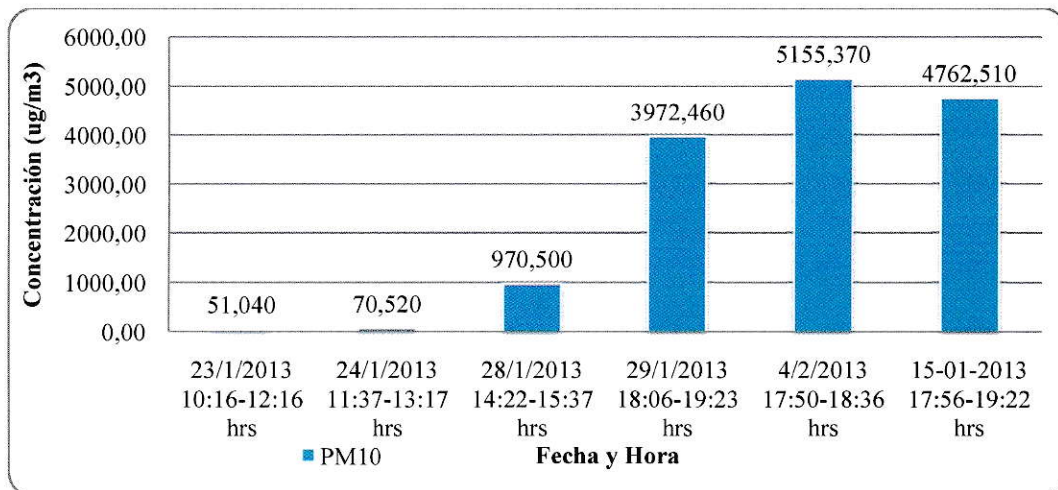


Figura 76. Promedios de PM_{10} de mediciones en diferentes horarios del S3.

Analizando los promedios de PM_{10} de mediciones en diferentes horarios del S3 (Fig.76) se observa una clara tendencia de incrementar las concentraciones desde la mañana a la tarde, siendo los valores de la tarde considerablemente mayores, se determina que la problemática se genera desde las 17:00 hrs en adelante respondiendo a la tendencia del incremento de la velocidad del viento (ver Fig.78).

3.7.5. Mediciones fuera del muro.

De estas mediciones cabe destacar que la realizada el día 15 de Febrero de 2013 cerca del dren basal, en conjunto con mediciones del S3, indica que existen valores altos aún a metros del muro. En promedio se tienen valores cercanos a $1200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PST, con una medición máxima de $2577,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ver Tabla 48). Esto reconoce que el material particulado viaja desde el muro empujado por la acción del viento desde la cubeta hacia esa dirección.

Las mediciones realizadas en el cerro (torta) a 600 metros del muro mostraron valores de $127,46$ y $476,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente como promedios de PST (ver Tabla 47), donde los niveles de PM_{10} se encuentran bajo los $170,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aproximadamente (ver Tabla 48). Esto indica que la nube de material desprendido no viaja en esa dirección y no se encuentran niveles altos de material particulado en esa zona.

La medición puntual cercana a la playa arroja valores muy bajos de PST, PM_{10} , $PM_{2,5}$ y PM_1 con promedios de $101,26 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $44,83 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $10,35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $2,35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Lo que permite concluir que el material no proviene del arrastre desde la cubeta, inclusive en horario crítico de la tarde.

Se muestran en la Fig. 77 los valores de promedios de PM_{10} que grafican el comportamiento del material particulado fuera del muro.

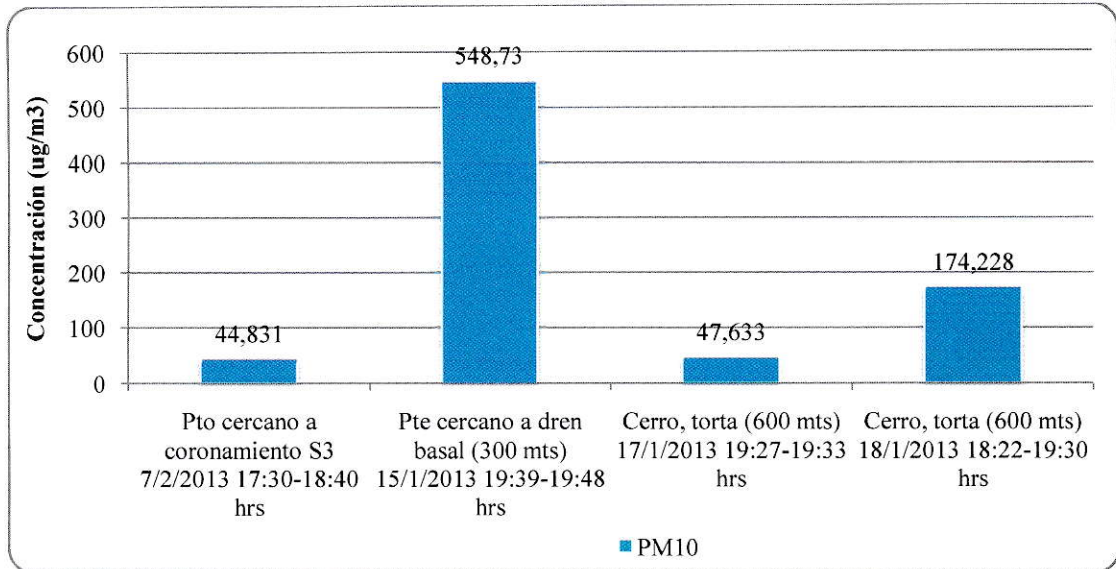


Figura 77. Mediciones de promedios de PM_{10} fuera del muro; punto cercano a coronamiento S3, puente cercano a dren basal (300 metros), cerro (600 metros).

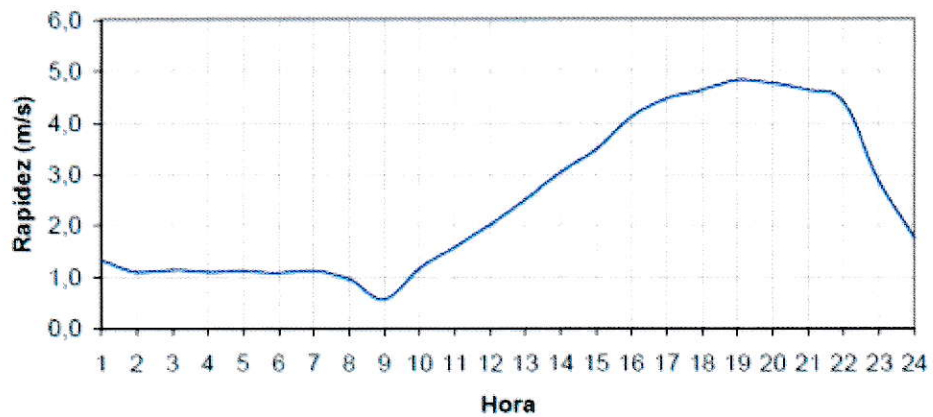


Figura 78. Ciclo diario de rapidez del viento.

Este gráfico (Fig. 78) representa el ciclo diario de rapidez del viento promedio en las diferentes horas del día. Se observa que en las horas de la mañana se mantiene una velocidad baja cercana a los 1,0 m/s que se mantiene hasta las 9:00 hrs. Luego se

observa un crecimiento lineal de la velocidad del viento desde las 10:00 hrs hasta las 19:00 hrs, desde los 1,0 m/s a los aproximadamente 5 m/s, manteniéndose hasta las 22:00 hrs, luego bajando la velocidad hasta las 24 hrs.

Este ciclo diario se puede extrapolar a las velocidades máximas, manteniendo el mismo comportamiento con velocidades mayores, que alcanzan hasta los 10 m/s aproximadamente.

En el estudio se eligieron los horarios que responden a la zona horaria donde el crecimiento es lineal, para luego analizar la relación existente entre la velocidad del viento y la generación de material desprendido. Como se puede observar en la Fig. 76 de los valores promedios de PM_{10} del S3 se observa que a mayor velocidad del viento, mayores concentraciones de material particulado siguiendo el patrón lineal del ciclo. Por tanto, se puede concluir que la entrada de viento proveniente de la cubeta en dirección SSE que afecta principalmente a el S3 y S2-B tiene relación directa con el material desprendido de esos sectores, reflejado en las concentraciones de material particulado resultantes en las mediciones. Además de concluir que a mayor velocidad del viento, más impacto en el talud del muro, por tanto, mayor desprendimiento de material provocado por la erosión eólica.

IV. CONCLUSIONES

4.1. Conclusiones Trampas de Leatherman.

- Se concluye que los sectores problemáticos en levantamiento de arenas por saltación y arrastre son los S2-B y S3, recolectando 1142,844 g y 2878,632 g, respectivamente, donde el S3 concentra la mayor cantidad de material removido. El S2-A presenta un comportamiento intermedio recolectando 760,789 g y el S1-B y S1-A representan sectores de calma recolectando 311,267 g y 23,629 g, respectivamente, siendo el S1-A el que concentra los valores más bajos de cantidad de material removido.
- La trampa que capturó más material del muestreo total fue la T8 en el S3 con 1053,900 g. Y las trampas que capturaron menos material del muestreo total fueron las trampas T1 y T2 del S1-A con 0,002 g por trampa.
- Los resultados de los sectores 2-B y 3, permiten concluir que el levante y saltación del material de esos sectores tienen estricta relación con la dirección predominante (SSE) e intensidad del viento proveniente de la cubeta.
- La cantidad de material removido se manifiesta de forma ascendente desde el S1-A al S3.

4.2. Conclusiones material particulado.

- El comportamiento del material particulado generado en el muro tiene estricta relación con el ciclo de la velocidad de los vientos y la entrada del viento SSE proveniente de la cubeta. Los valores más altos de velocidad de los vientos se

encuentran en la tarde, con un promedio de 10,1 m/s, donde se encuentran los episodios de mayores concentraciones de material particulado medidos.

- Los valores más bajos de PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ encontrados en todos los sectores, fueron en horario de la mañana, mientras los más altos en horarios de la tarde.
- Los valores más altos de PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ fueron encontrados en el Sector 3 en horario de la tarde. Seguido por el sector 2-B.
- Los valores más bajos de PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ fueron encontrados en el Sector 1-A en horario de la mañana.
- Los sectores 1-A, 1-B y 2-A son considerados sectores de calma, inclusive en horarios críticos de la tarde.
- Los sectores 2-B y 3 se ven afectados por la entrada del viento de la dirección SSE proveniente de la cubeta. La dirección del viento afecta al sector 3 desde aproximadamente las 5:00 pm hasta las 7:00 pm, luego de esta hora se modifica levemente hacia el sector 2-B. Son considerados sectores problemáticos.
- Los resultados de las mediciones fuera del muro, arrojan que existen valores promedio relativamente altos (cerca de 1200 µg/m³ de PST) cercano a los 300 metros. Los resultados de la medición a 600 metros del muro, en la torta, arrojan valores bajos de 127,46 y 476,7 µg/m³ respectivamente como promedios de PST. Esto indica que la nube de material desprendido no viaja en esa dirección. La medición cercana a la playa arroja valores muy bajos de PST (101,26 µg/m³) lo que indica que el material particulado no proviene de la playa de la cubeta sino del mismo muro.

V. RECOMENDACIONES.

5.1. Estación de Monitoreo.

Debido a la presente problemática del arrastre de material particulado desde el Muro, se recomienda una nueva estación de monitoreo o el traslado de la presente estación colocándola en una posición representativa para luego analizar los resultados arrojados de las concentraciones de material particulado y controlar el comportamiento del levantamiento de material desde el Muro (ver Fig. 79). Esto permitiría mejorar e inspeccionar las operaciones realizadas para la mitigación de ésta situación.

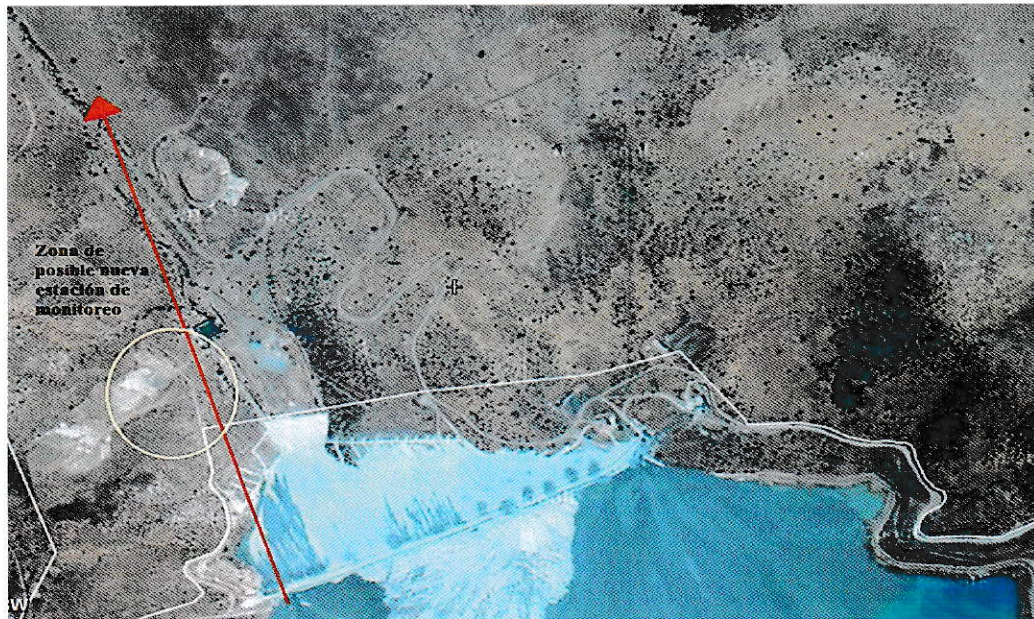


Figura 79. Gráfica de zona propuesta para una nueva estación de monitoreo o del traslado de la estación actual.

5.2. Barreras mecánicas (paneles)

Debido a las condiciones del tranque y las operaciones del Muro se pueden realizar las siguientes recomendaciones para evitar y mitigar la erosión eólica provocada naturalmente por los vientos provenientes principalmente de una dirección SSE desde la cubeta.

Este viento, de grado 5-6 en la escala Beaufort (fuerte-muy fuerte), exige la interposición de algún tipo de barrera arquitectónica que garantice las mínimas exigencias de confortabilidad, amortiguando a la vez la incidencia de las turbulencias que su magnitud origina.

Como una solución para obstruir y desviar el viento se plantea la construcción de paneles como barreras mecánicas. Aunque existen mallas Rachel, que se acostumbran a utilizar en estos tipos de Tranque, no se ha visto mejoras de disminuir la intensidad de los vientos provenientes de la cubeta. Por tanto, se proponen dos tipos de paneles que permitan un mecanismo de obstrucción y de deflación. Los paneles serían posicionados en la zona del borde del coronamiento hacia la cubeta y otra zona anexa al coronamiento que, actualmente, está descubierta dejando entrar el viento proveniente de esa dirección (ver Fig. 80). Estos paneles tendrían la finalidad de disminuir la intensidad del viento y desviarlo de forma que al llegar al talud del muro no tenga la intensidad suficiente para arrastrar ni levantar las partículas de arena.

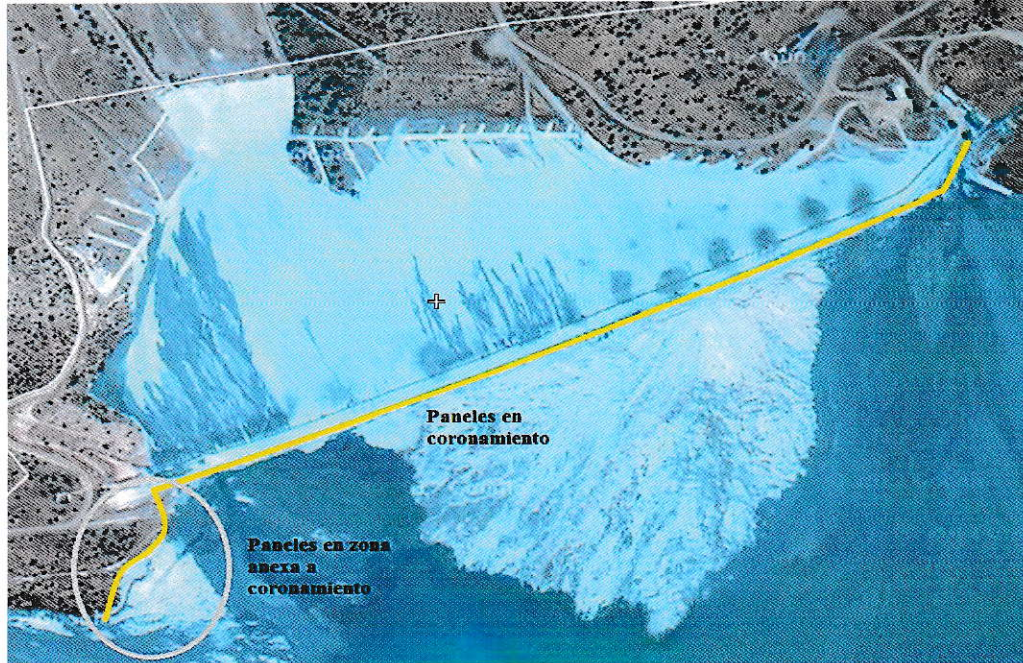


Figura 80. Gráfica de posicionamiento de paneles en el Muro, se observan dos zonas; coronamiento y zona anexa a coronamiento.

Se proponen dos diseños para que la empresa elija, por sus ventajas y desventajas, según estime conveniente. Ambos consideran la situación del crecimiento del tranque, por tanto, son diseños que permiten ser desmontables para una nueva colocación o traslado según las condiciones en que se encuentre el Muro. Los presentes diseños pueden ser modificables. Se aconsejan ciertos materiales que son agradables a la vista y resistentes tanto al viento como al calor.

El primer diseño es realizado con planchas OSB y madera, en cambio el segundo, con un diseño parecido se plantea con placas de policarbonato y acero o fierro. Los diseños se presentan a continuación (ver Figuras 81 y 82):

QUEBRAVIENTO DE MADERA

NOTA1: LOS PARES DE PILARES DE MADERA DE 4"x4" IRÁN ESPACIADOS CADA 2.3 METROS
 NOTA2: LA SEPARACIÓN ENTRE PILARES SERÁ DE 2 CENTÍMETROS PARA INSERTAR LA PLACA OSB

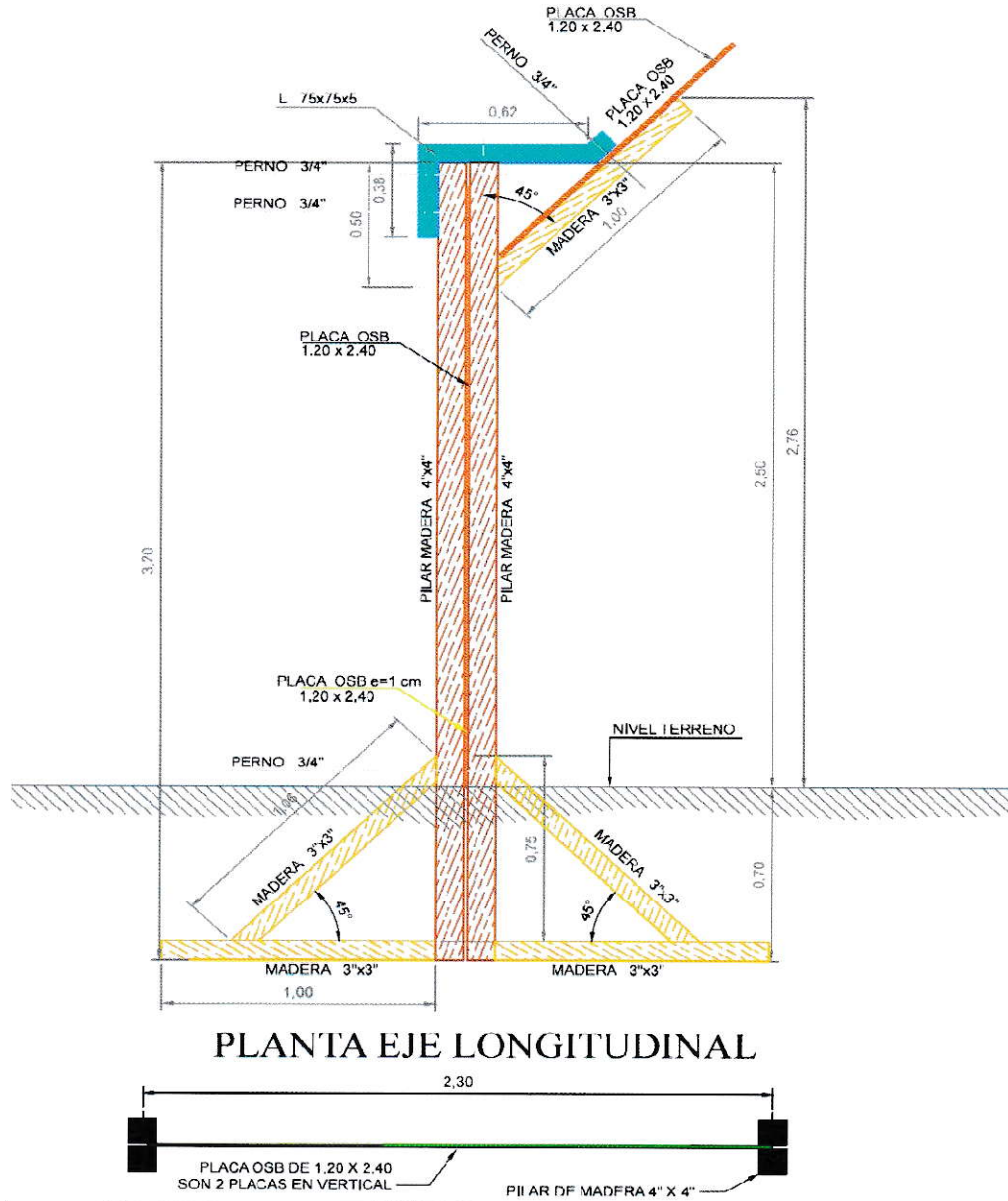
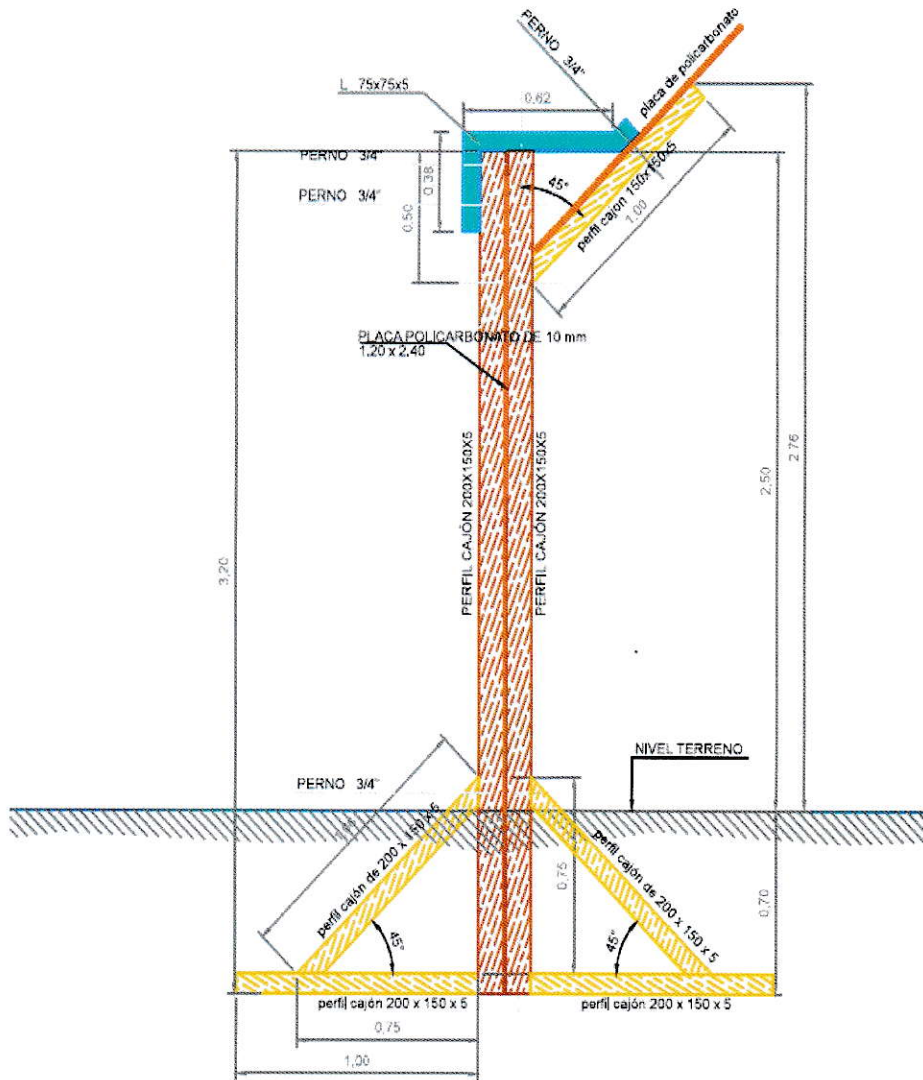


Figura 81. Diseño de quebraviento de madera, junto a sus medidas y materiales, además del diseño de planta eje longitudinal.

QUEBRAVIENTO DE POLICARBONATO



PLANTA EJE LONGITUDINAL

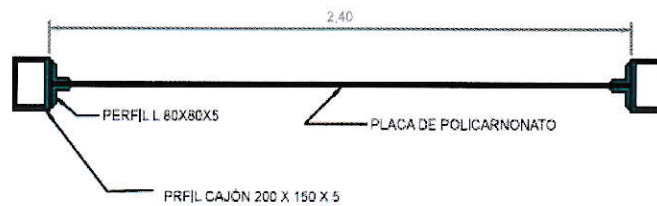


Figura 82. Diseño de quebraviento de policarbonato, junto a sus medidas y materiales, además del diseño de planta eje longitudinal.

5.3. Sistema de riego

Uno de los parámetros operacionales de mayor importancia en la mitigación del levantamiento de material, es el riego. Actualmente, el sistema de riego es mediante aspersores que abarcan aproximadamente 60 m como circunferencia y utilizan en promedio un caudal de 11 L/s. Aún así existe un riego no homogéneo (ver Fig. 83) que no cumple la función de humedecer las zonas correspondientemente. Para mejorar el sistema de riego se recomiendan las siguientes modificaciones:

Se considera que las situaciones críticas de levantamiento tienen estricta relación con las condiciones climáticas del entorno. Por tanto, el riego debe ser enfocado para los meses de primavera, verano. Enfatizando los meses Diciembre, Enero y Febrero.

Debido a que el agua utilizada para el riego es distribuida para diferentes procesos, se propone aumentar el caudal hacia el sistema de riego para abarcar más área en los sectores problemáticos. Si no existiera esa posibilidad sería necesario priorizar ciertos sectores que necesiten de mayor flujo de agua para su presente humectación.

Por los resultados obtenidos de las mediciones de las trampas de saltación pasiva, se pueden determinar las zonas exactas donde se inicia el movimiento de saltación y arrastre, esto permite enfatizar el riego en esos puntos, optimizando el agua utilizada.

Se observa que los sectores donde se debería enfatizar el riego son:

- Sector 3
- Sector 2-B
- Coronamiento

Puntualmente en el S3 y S2-B, debiera ser regado la zona presentada en la Fig. 84.



Figura 83. Imagen de riego no homogéneo en coronamiento de sector 2-B y sector 3.

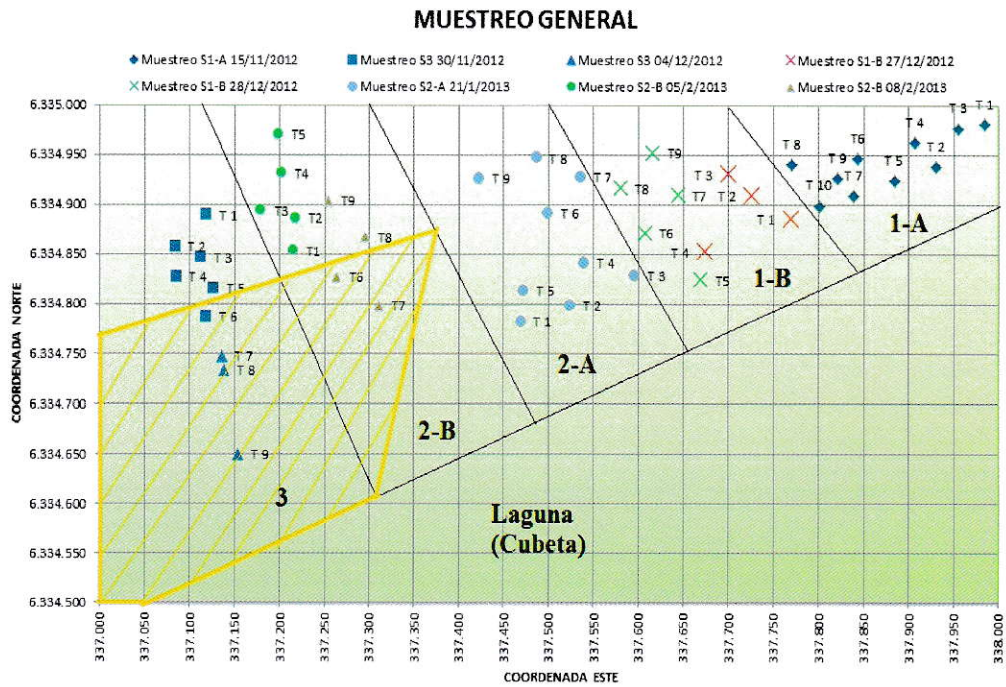


Figura 84. Representación de zona que preferentemente el riego debiera ser enfatizado.

Es aconsejable optimizar el horario de riego; preferir el riego del coronamiento en Sector 3 y a la vez del talud del Sector 3 antes de las 17:30 horas, en preferencia desde las 17:00 horas para que cuando ocurran los episodios de vientos fuertes, esas zonas estén recientemente humectadas y no hayan sido afectadas por el calor.

Se deben considerar riegos en horario nocturno y observar los posibles cambios de levantamiento de arena.

Si todavía existiera el riego por aspersión, acomodar el ángulo de los aspersores a uno menor para así evitar la dispersión del agua por el viento a una zona no estipulada.

Debido a que el riego por aspersores tiene algunas limitaciones, se propone implementar un nuevo sistema de riego con un diseño móvil de aspersión. Existen diversos sistemas de riego móvil, pero actualmente se utiliza el sistema de pivote central (ver Fig. 85) en agricultura o para terrenos donde el agua es un factor fuertemente limitante. Ese diseño permite regar un área considerable con una pérdida de agua menor y permite regar las zonas de manera pareja, homogénea y controlada.



Figura 85. Sistema de riego móvil Pivote.

Ya que el sistema de riego Pivot posee un gran costo de inversión y operación y es utilizado para procesos que más elaborados no sería una opción viable momentáneamente, pero se puede tomar como referencia para realizar un diseño parecido de menor costo que se adecue a las condiciones del Muro. Este sistema permitiría regar de forma móvil las zonas comprometidas sin necesidad de un gasto excesivo de agua, optimizando mediante aspersores la utilización del caudal dejando un riego homogéneo.

5.4. Sistemas operacionales.

En términos de operación, se recomienda lo siguiente:

- Inversión en nuevas mangueras de mayor longitud para alcanzar los puntos problemáticos que deberían ser regados.
- Organizar, preferentemente, todo tipo de movimientos o construcciones que no permitan el riego en los sectores problemáticos para épocas de invierno.
- Crear planes de emergencia para condiciones críticas de levantamiento de polvo. Esto incluiría un riego en esos episodios.
- Favorecer la depositación en los sectores 2-B y 3 en las épocas de verano y evitar cualquier tipo de operación que impida este proceso.

5.5. Recomendaciones futuras

Considerando que el Tranque posee un constante crecimiento, es necesario estimar medidas futuras que permitan mejorar el sistema de mitigación de polvo. Debido a que el principal problema es la entrada del viento se haría conveniente determinar medidas para los muros posteriores, para esto, en vez de realizar barreras mecánicas

artificiales podrían ocuparse árboles o arbustos en las zonas adyacentes a los muros de manera de filtrar, desviar, obstruir o encausar el viento como se estime conveniente (ver Fig. 86). Para esto, son necesarios estudios más detallados del tema.



Figura 86. Árboles que se utilizan en agricultura y otras disciplinas como barreras naturales contra el viento.

En relación al riego, sería favorable realizar pruebas agregando sales al agua, que formarían una capa sobre la superficie haciéndola más resistente a la fuerza del viento.

Realizar un nuevo modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos que involucre el comportamiento del material particulado generado del muro y la cubeta del tranque para que luego de cualquier tipo de mejoría existan antecedentes o una línea base del comportamiento del material para posteriormente evaluar la optimización de las mejoras y realizar comparaciones de eficiencia de las soluciones.

V. REFERENCIAS

Bagnold, R.A, 1941. The physics of wind and desert dunes Methuen & Co Ltd, London

Decreto Supremo N°248, "Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relave", Ministerio de Minería, Publicado en el Diario Oficial el 11 de Abril de 2007.

Decreto Supremo N°132, "Reglamento de Seguridad Minera", Ministerio de la Minería, Publicado el 7 de Febrero de 2004.

Espinace, R. y col, 2006. Evaluación del efecto eólico en Tranques de relave.

Jaramillo, I. Miranda, A., 2003, Metodología y aplicaciones para minimizar los efectos de la erosión eólica en tranques de arenas de relaves. Tesis de título para optar al grado de Ingeniero Constructor Pontificia Universidad Católica.

Mezcaros E, 1999. Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry. Akadémiai Kiado.

Norma Chilena Oficial 432 OF.71, 1971, Cálculo de la acción del viento sobre las construcciones.

Palma, Juan. y col, 2007. "Estabilización de taludes de Tranques de relaves afectados por la erosión eólica".

S.P. Leatherman., 1978 "A new aeolian sand trap design", Volumen 25, Capítulo 2, pp 303-306.

Warneck, 1988. Chemistry of the natural atmosphere. International Geophysics Series. Wiley & Sons. Vol. 41. Academy Press, pp. 757.

ANEXOS

ANEXO A

Descripción de los componentes principales de un Depósito de
Relaves y algunos otros conceptos importantes.

- **Cubeta.-** Corresponde al volumen físico disponible donde se depositan las lamas (finos) y gran parte del agua de los relaves de tal modo que se forma en ella la laguna de aguas claras, debido a la sedimentación de las partículas finas. La cubeta es la componente más importante en relación con la vida útil del depósito.
- **Muro.-** Este muro delimita la cubeta y permite contener los residuos que en ella se descargan. Por lo tanto, el muro perimetral generalmente es la componente más importante en lo que dice relación con la estabilidad o grado de seguridad del depósito. En los tranques de relaves este muro se va construyendo con el material grueso (arenas) de los relaves a lo largo de la vida útil del depósito.
- **Sistema de Descarga y/o Clasificación y Selección de los Relaves.-** El sistema de descarga de residuos mineros permite depositar estos en la cubeta, (uso de ciclones)
- **Zona de descarga de los Residuos o Playa.-** La zona donde se descargan los residuos a la cubeta se le llama zona de playa porque usualmente está seca en la superficie y se asemeja a una playa de arenas finas. Es la parte del depósito de relaves o lamas situada en las cercanías de la línea de vaciado, esta playa de forma junto al prisma resistente.
- **Poza de Aguas Claras o Laguna de Decantación.-** Corresponde a la laguna de aguas clarificadas que se forma en la cubeta debido a la sedimentación o decantación de las partículas sólidas. Esta poza permite la recuperación de aguas y al mismo tiempo la evacuación de estas desde la cubeta. Esta laguna debe mantenerse lo más alejada posible del muro de arenas o prisma resistente y su evacuación debe hacerse siempre para no disminuir el grado de estabilidad del muro.
- **Sistema de Recuperación de Aguas.-** El sistema de recuperación de aguas permite devolver a la planta, las aguas claras que se han recuperado desde la poza o laguna de aguas clara, mediante bombeo desde balsas y/o descargas de torres de evacuación o decantación que son obras destinadas a la descarga gravitacional de las aguas claras desde la poza de decantación de un tranque o embalse de relaves.
- **Berma de Coronamiento.-** Es la faja horizontal de mayor cota del talud externo del prisma resistente o muro de contención.

- **Revancha.-** Es la diferencia de cota entre la línea de coronamiento y la superficie inmediatamente vecina de la fracción aguas adentro del tranque, generalmente lamosa o de arena muy fina. Se denomina como revancha mínima al desnivel entre el coronamiento del prisma resistente y el punto más alto de las lamas; y se denomina revancha máxima al desnivel entre el coronamiento y la superficie de la poza de decantación.

- **Talud.-** En general, un talud es una zona plana inclinada. En Arquitectura e Ingeniería civil, se refiere a la pendiente de un muro, la que es más gruesa en el fondo que en la parte superior de éste, de modo que así resista la presión del suelo tras él.

- **Muro de Partida.-** Muro construido con material grueso de empréstito al inicio del depósito de relaves. En los sistemas constructivos del muro resistente de aguas abajo y eje central, las arenas se vacían hacia aguas abajo del muro inicial y las lamas hacia aguas arriba. La altura del muro de partida queda determinada por el avance en altura del prisma de arenas, en relación al avance en altura del nivel de lamas. El muro inicial debe permitir mantener una revancha mínima a lo largo del período de operación del tranque.

- **Licuefacción.-** Pérdida total de la resistencia al corte de un suelo saturado por incremento de la presión de poros. El caso más frecuente de licuefacción ocurre por acción sísmica sobre materiales areno-limosos saturados. Los relaves saturados son altamente susceptibles a licuefacción sísmica, en especial, si la permeabilidad y densidad son bajas. Es el fenómeno más preocupante que ocurra en un Tranque.

- **Hidrociclones.-** Son dispositivos que operan según los principios centrífugos y separa la pulpa de Relave alimentada en una descarga por abajo (underflow) a arenas que contienen entre 5-30% de material más fino de 0,074 mm y otra por arriba (overflow o rebose) que se descarga al depósito de relaves. Si el cicloneo se realiza en forma continua y no es interrumpido por descargas de relaves sin ciclonar, entonces los relaves depositados a partir del rebose estarán conformados en su mayoría por lamas uniformes. La arena resultante se le llama arena ciclada.

- **Ensayo Proctor Estándar.-** Corresponde a un procedimiento de estudio y control de calidad de la compactación de un terreno. A través de éste es posible determinar la compactación máxima de un terreno en relación con su grado de humedad, condición que optimiza el inicio de la obra con relación al costo y el desarrollo estructural e hidráulico. Existen dos tipos de ensayo Proctor normalizados; el "Ensayo Proctor Normal", y el "Ensayo Proctor

Modificado".. Ambos ensayos determinan la máxima densidad que es posible alcanzar para suelos o áridos, en unas determinadas condiciones de humedad.

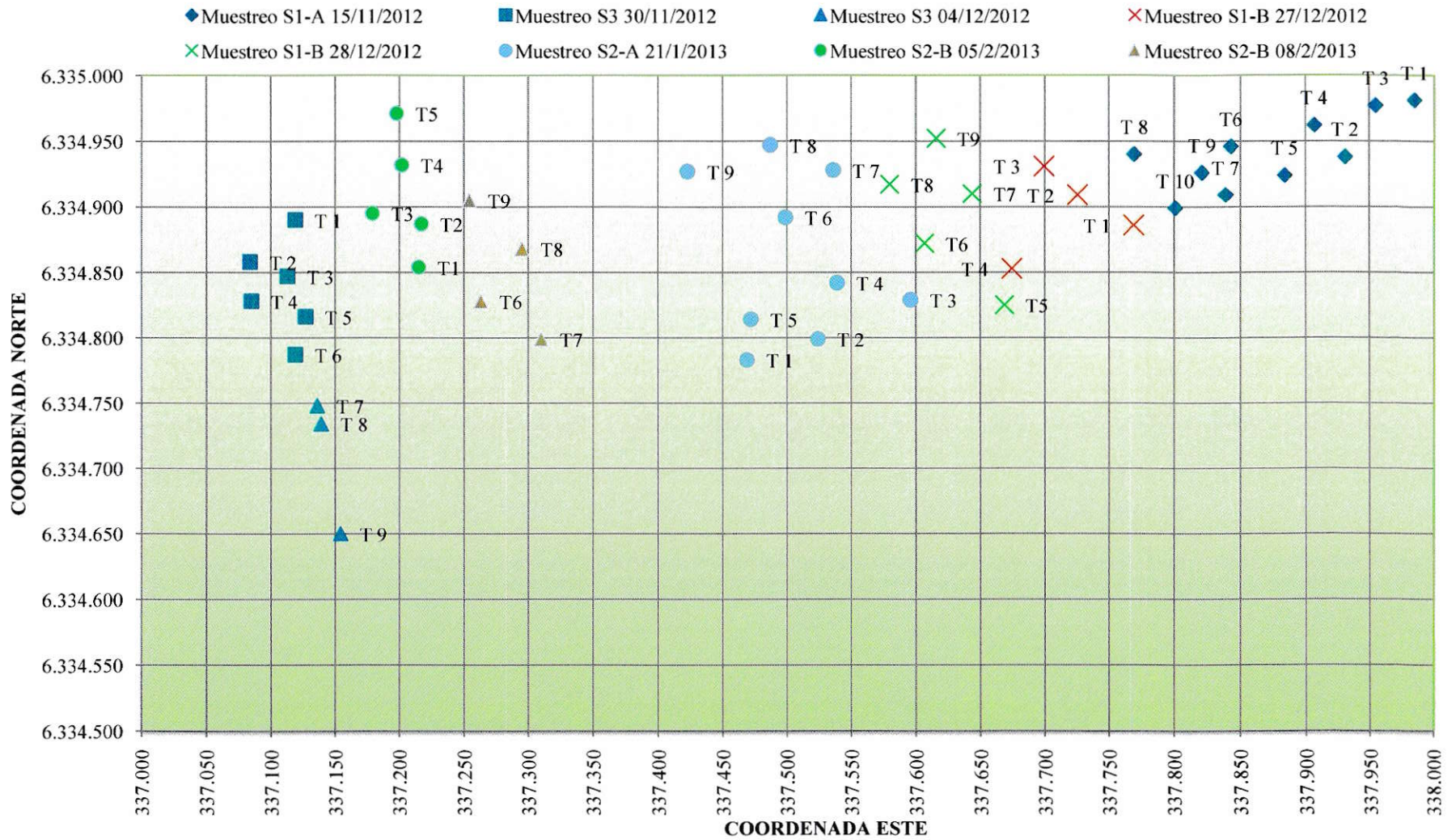
- **Ley de corte.-** Ley que especifica un límite mínimo de un 30% de mineral del total del material extraído para su procesamiento
- **Mineroducto.-** Tubería reforzada bajo suelo que transporta mineral desde una mina hasta una Planta de obtención de concentrado.
- **Dren Basal.-** proyecto de ingeniería encargado de recuperar las aguas drenadas del muro. Este dren conduce las aguas hasta la piscina de recolección de filtraciones ubicadas aguas abajo del muro para su posterior recirculación.
- **Blister.-** Cobre producido a partir de la fusión de la mata o eje en los hornos convertidores con una pureza de 99,5%. Este cobre es llevado a los hornos de refinado y de moldeo desde donde se obtiene el cobre anódico que va a la electrorrefinación. Su nombre proviene del aspecto que tienen los productos moldeados en su superficie (blíster = ampolla).

ANEXO B

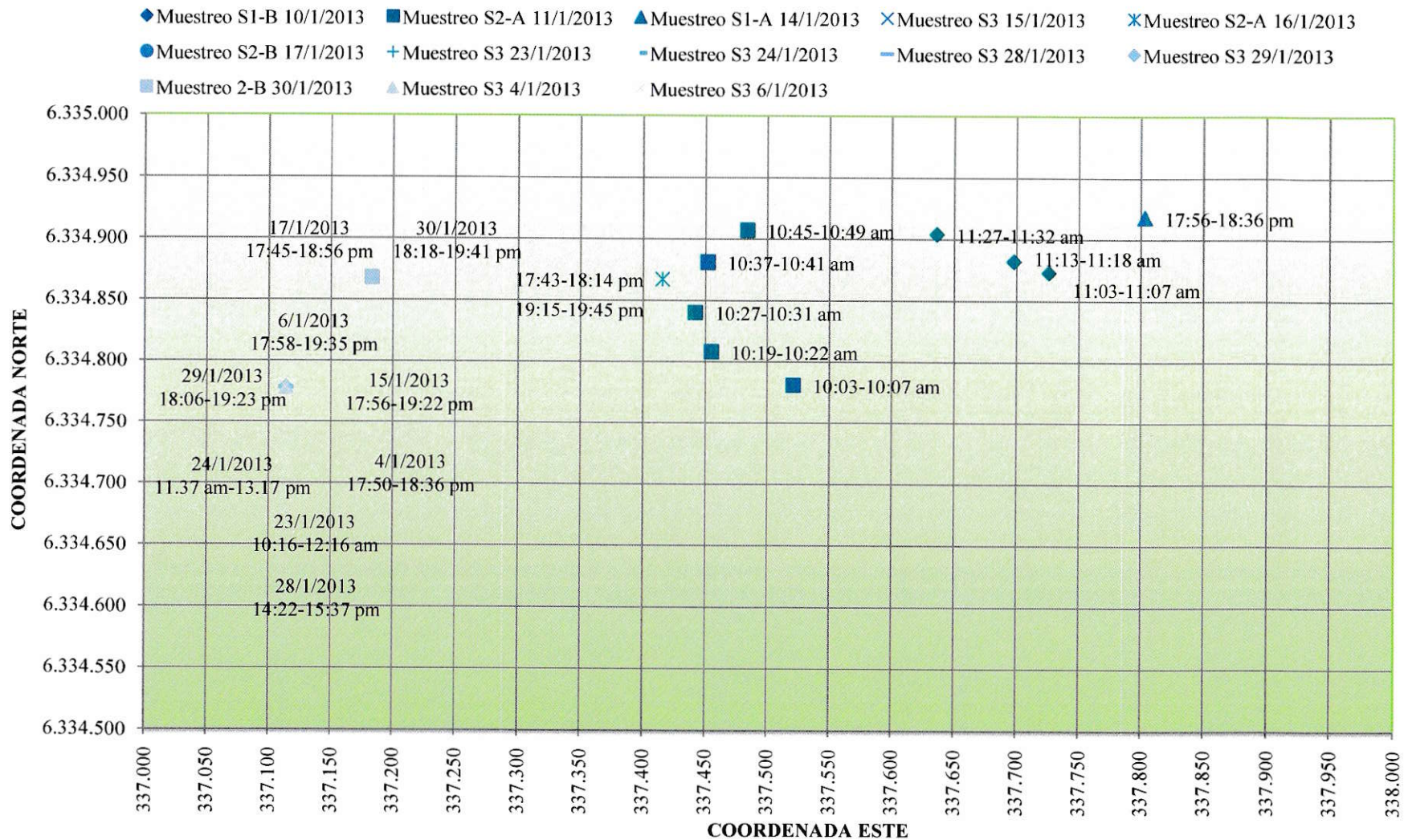
Trampas de Leatherman

- Muestreo General de Trampas de Leatherman
- Horarios de muestreo de PM, dentro y fuera del muro
- Plan maestro de muestreo de PM
- Coordenadas y posicionamiento de trampas colocadas
- Masa neta recolectada de cada una

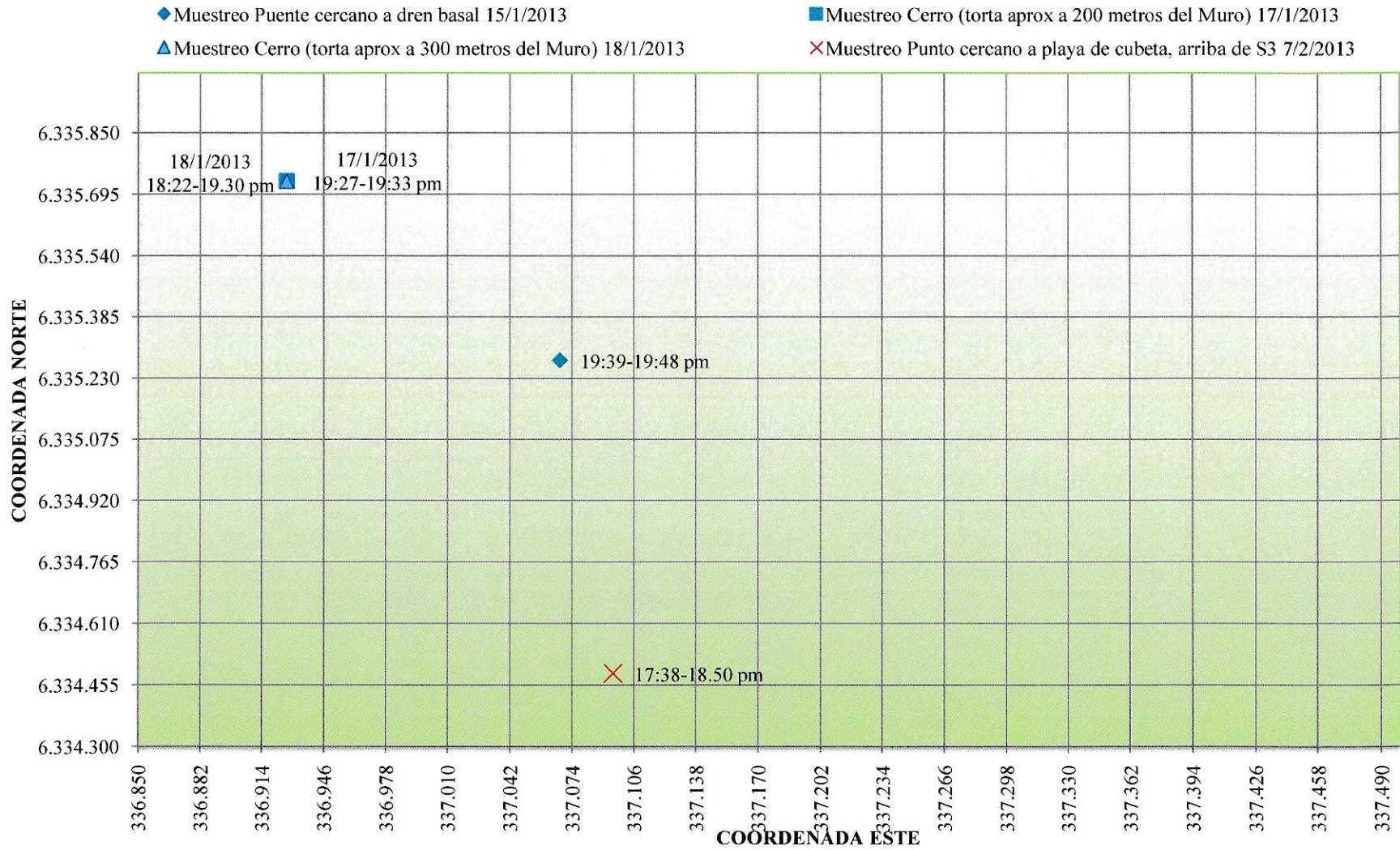
MUESTREO GENERAL



HORARIOS DE MUESTREO PM (en el Muro)



HORARIOS DE MUESTREO PM (fuera del Muro)



Fecha de medición	Hora de inicio	Hora de término	Minutos de medición	N° de muestra	Sector	Punto GPS	Coordenadas	Velocidad promedio de viento (m/s)	Velocidad máxima de viento (m/s)	Descripción de lugar de medición
9/1/2013	10:38 am	10:38 am	1	3	1-A	-	-	0,4	0,7	S1-A
	10:49 am	10:49 am	1	4						
	11:35 am	11:35 am	1	5						
10/1/2013	11:03 am	11:07 am	4	6	1-B	58	337726/6334873	0,5	0,8	S1-B
	11:13 am	11:18 am	5	7	1-B	59	337698/6334882	0,7	1,1	
	11:27 am	11:32 am	5	8	1-B	60	337636/6334904	0,8	1,4	
11/1/2013	10:03 am	10:07 am	4	9	2-A	61	337521/6334781	2,7	3,7	S1-A
	10:19 am	10:22 am	3	10	2-A	62	337455/6334808	2,8	3,6	
	10:27 am	10:31 am	4	11	2-A	63	337442/6334840	3,2	4,9	
	10:37 am	10:41 am	4	12	2-A	64	337452/6334881	3,1	4,6	
	10:45 am	10:49 am	4	13	2-A	65	337484/6334907	2,5	3,5	
14/1/2013	17:56 pm	18:36 pm	80	14	1-A	66	337803/6334918	5,5	6,1	S1-A
15/1/2013	17:56 pm	19:22 pm	166	15	3	67	337114/6334778	8,1	10,4	S3
	19:39 pm	19:48 pm	9	16	-	68	337068/6335275	7,2	8,1	Puente cercano a dren basal
16/1/2013	17:43 pm	18:14 pm	71	17	2-A	69	337416/6334867	5,4	7,0	S2-A
	19:15 pm	19:45 pm	30	18	2-A	69	337416/6334867	5,3	7,1	S2-A
17/1/2013	17:45 pm	18:56 pm	111	21	2-B	70	337183/6334868	6,1	8,1	S2-B
	19:27 pm	19:33 pm	6	22	-	71	336927/6335728	7,9	9,5	cerro (torta aprox a 300 metros del muro)
18/1/2013	18:22 pm	19:30 pm	108	23	-	72	336927/6335728	5,1	7,9	cerro (torta aprox a 300 metros del muro)
23/1/2013	10:16 am	12:16 am	200	24	3	67	337114/6334778	2,1	2,8	S3
24/1/2013	11:37 am	13:17 pm	180	25	3	67	337114/6334778	2,6	3,2	S3
28/1/2013	14:22 pm	15:37 pm	115	26	3	67	337114/6334778	4,5	6,9	S3
29/1/2013	18:06 pm	19:23 pm	117	27	3	67	337114/6334778	7,9	10,1	S3
30/1/2013	18:18 pm	19:41 pm	123	28	2-B	70	337183/6334868	5,3	7,0	S2-B
4/2/2013	17:50 pm	18:36 pm	86	29	3	67	337114/6334778	8,5	11,6	S3
6/2/2013	17:58 pm	19:35 pm	177	30	3	67	337114/6334778	7,1	7,9	S3
7/2/2013	17:38 pm	18:50 pm	112	31	-	85	337095/6334484	7,5	7,9	Punto cercano a playa de cubeta, arriba de S3

1. TABLAS DE LAS MEDICIONES DE TRAMPAS DE LEATHERMAN.

1.1. Resultados S1-A.

Tabla 21. Coordenadas y posicionamiento de trampas en S1-A.

Número Trampa	Sector	Coordenadas	Punto GPS	Día de posicionamiento	Hora de posicionamiento	Día de retirada	Hora de retirada
10	1-A	0337301 6334899	23	15/11/2012	9:00 am	22/11/2012	9:20 am
8	1-A	0337770 6334940	24	15/11/2012	9:20 am	22/11/2012	9:24 am
9	1-A	0337821 6334926	25	15/11/2012	9:40 am	22/11/2012	9:26 am
7	1-A	0337839 6334909	26	15/11/2012	10:00 am	22/11/2012	9:30 am
6	1-A	0337843 6334946	28	15/11/2012	10:20 am	22/11/2012	9:32 am
5	1-A	0337884 6334924	29	15/11/2012	10:40 am	22/11/2012	9:34 am
4	1-A	0337907 6334962	30	15/11/2012	11:00 am	22/11/2012	9:40 am
2	1-A	0337931 6334938	31	15/11/2012	11:20 am	22/11/2012	9:42 am
3	1-A	0337955 6334977	32	15/11/2012	11:40 am	22/11/2012	9:44 am
1	1-A	0337985 6334981	33	15/11/2012	12:00 am	22/11/2012	9:48 am

Tabla 22. Peso Neto de trampas del S1-A.

Número Trampa	Sector	Día de posicionamiento	Día de pesaje	Peso Vaso (g)	Peso Vaso(g) + Arena	Masa Neta (g)
10	1-A	15/11/2012	26/11/2012	107,994	111,113	3,119
8	1-A	15/11/2012	26/11/2012	107,986	110,512	2,530
9	1-A	15/11/2012	26/11/2012	107,982	113,155	5,173
7	1-A	15/11/2012	26/11/2012	107,989	109,710	1,721
6	1-A	15/11/2012	26/11/2012	107,984	111,918	3,934
5	1-A	15/11/2012	26/11/2012	107,985	112,104	4,119
4	1-A	15/11/2012	26/11/2012	107,986	110,905	2,919
2	1-A	15/11/2012	26/11/2012	107,986	108,096	0,110
3	1-A	15/11/2012	26/11/2012	107,986	107,988	0,002
1	1-A	15/11/2012	26/11/2012	107,986	107,988	0,002

1.2. Resultados S1-B.

Tabla 23. Coordenadas y posicionamiento de trampas en S1-B.

Número Trampa	Sector	Coordenadas	Punto GPS	Día de posicionamiento	Hora de posicionamiento	Día de retirada	Hora de retirada
1	S1-B	0337769 6334886	45	27/12/2012	1:35 pm	3/01/2013	1:26 pm
2	S1-B	0337725 6334909	46	27/12/2012	1:45 pm	3/01/2013	1:28 pm
3	S1-B	0337699 6334931	47	27/12/2012	2:05 pm	3/01/2013	1:30 pm
4	S1-B	0337674 6334853	48	27/12/2012	2:25 pm	3/01/2013	1:31 pm
5	S1-B	0337669 6334825	49	28/12/2012	12:25 am	4/01/2013	1:32 pm
6	S1-B	0337607 6334872	50	28/12/2012	12:45 pm	4/01/2013	1:34 pm
7	S1-B	0337644 6334910	51	28/12/2012	1:05 pm	4/01/2013	1:36 pm
8	S1-B	0337580 6334917	52	28/12/2012	1:15 pm	4/01/2013	1:37 pm
9	S1-B	0337616 6334952	53	28/12/2012	1:34 pm	4/01/2013	1:38 pm

Tabla 24. Peso Neto de trampas del S1-B.

Número Trampa	Sector	Día de posicionamiento	Día de pesaje	Vaso Precipitado (g)	Vaso Precipitado (g) + Arena (g)	Masa Neta (g)
1	1-B	27/12/2012	3/01/2013	107,991	115,012	7,021
2	1-B	27/12/2012	3/01/2013	107,996	122,722	14,726
3	1-B	27/12/2012	3/01/2013	107,989	120,015	12,025
4	1-B	27/12/2012	3/01/2013	107,993	136,838	28,845
5	1-B	28/12/2012	4/01/2013	108,026	178,970	70,944
6	1-B	28/12/2012	4/01/2013	107,993	137,802	29,809
7	1-B	28/12/2012	4/01/2013	108,030	128,202	20,172
8	1-B	28/12/2012	4/01/2013	107,996	230,262	122,265
9	1-B	28/12/2012	4/01/2013	107,990	113,448	5,457

1.3. Resultados S2-A.

Tabla 25. Coordenadas y posicionamiento de trampas en S2-A.

Número Trampa	Sector	Coordenadas	Punto GPS	Día de posicionamiento	Hora de posicionamiento	Día de retirada	Hora de retirada
1	2-A	0337469 6334783	71	21/1/2013	10:32 am	28/1/2013	10:30 am
2	2-A	0337524 6334799	72	21/1/2013	10:48 am	28/1/2013	10:35 am
3	2-A	0337596 6334829	73	21/1/2013	10:55 am	28/1/2013	10:39 am
4	2-A	0337539 6334842	74	21/1/2013	11:08 am	28/1/2013	10:43 am
5	2-A	0337472 6334814	75	21/1/2013	11:20 am	28/1/2013	10:48 am
6	2-A	0337499 6334892	76	21/1/2013	11:42 am	28/1/2013	10:53 am
7	2-A	0337536 6334928	77	21/1/2013	11:57 am	28/1/2013	10:59 am
8	2-A	0337487 6334947	78	21/1/2013	12:14 am	28/1/2013	11:04 am
9	2-A	0337423 6354927	79	21/1/2013	12:31 am	28/1/2013	11:09 am

Tabla 26. Peso Neto de trampas del S2-A.

Número Trampa	Sector	Día de posicionamiento	Día de pesaje	Vaso Precipitado (g)	Vaso Precipitado (g) + Arena (g)	Masa Neta (g)
1	2-A	21/1/2013	28/1/2013	108,017	128,019	20,002
2	2-A	21/1/2013	28/1/2013	108,028	127,237	19,209
3	2-A	21/1/2013	28/1/2013	108,034	180,560	72,526
4	2-A	21/1/2013	28/1/2013	108,030	204,748	96,718
5	2-A	21/1/2013	28/1/2013	107,993	206,659	98,666
5	2-A	21/1/2013	28/1/2013	107,995	167,651	59,656
6	2-A	21/1/2013	28/1/2013	107,995	206,738	98,743
6	2-A	21/1/2013	28/1/2013	107,994	194,595	86,601
7	2-A	21/1/2013	28/1/2013	107,992	120,300	12,308
8	2-A	21/1/2013	28/1/2013	108,002	214,507	106,505
8	2-A	21/1/2013	28/1/2013	107,993	177,092	69,099
9	2-A	21/1/2013	28/1/2013	107,993	128,749	20,756

1.4. Resultados S2-B.

Tabla 27. Coordenadas y posicionamiento de trampas en S2-B.

Número Trampa	Sector	Coordenadas	Punto GPS	Día de posicionamiento	Hora de posicionamiento	Día de retirada	Hora de retirada
1	2-B	0337215 6334854	80	5/2/2013	10:22 am	12/2/2013	10:01 am
2	2-B	0337217 6334887	81	5/2/2013	10:37 am	12/2/2013	10:03 am
3	2-B	0337179 6334895	82	5/2/2013	10:59 am	12/2/2013	10:05 am
4	2-B	0337202 6334932	83	5/2/2013	11:12 am	12/2/2013	10:07 am
5	2-B	0337198 6334971	84	5/2/2013	11:34 am	12/2/2013	10:10 am
6	2-B	0337263 6334828	86	8/2/2013	10:15 am	15/2/2013	10:23 am
7	2-B	0337310 6334799	87	8/2/2013	10:33 am	15/2/2013	10:25 am
8	2-B	0337295 6334868	88	8/2/2013	10:48 am	15/2/2013	10:31 am
9	2-B	0337254 6334905	89	8/2/2013	10:57 am	15/2/2013	10:35 am

Tabla 28. Peso Neto de trampas del S2-B.

Número Trampa	Sector	Día de posicionamiento	Día de pesaje	Vaso Precipitado (g)	Vaso Precipitado (g) + Arena (g)	Masa Neta (g)
1	2-B	5/2/2013	13/2/2013	108,090	137,041	28,951
2	2-B	5/2/2013	13/2/2013	107,991	204,925	96,934
2	2-B	5/2/2013	13/2/2013	107,991	199,802	91,811
2	2-B	5/2/2013	13/2/2013	107,990	200,215	92,225
2	2-B	5/2/2013	13/2/2013	107,990	143,357	35,367
3	2-B	5/2/2013	13/2/2013	108,003	170,908	62,905
3	2-B	5/2/2013	13/2/2013	108,000	202,956	94,956
3	2-B	5/2/2013	13/2/2013	107,994	127,773	19,779
4	2-B	5/2/2013	13/2/2013	107,988	173,249	65,261
4	2-B	5/2/2013	13/2/2013	107,990	210,760	102,77
4	2-B	5/2/2013	13/2/2013	107,990	205,207	97,217

4	2-B	5/2/2013	13/2/2013	107,990	198,530	90,54
5	2-B	5/2/2013	13/2/2013	108,023	135,934	27,911
6	2-B	8/2/2013	15/2/2013	108,028	133,933	25,905
7	2-B	8/2/2013	15/2/2013	107,994	132,530	24,536
8	2-B	8/2/2013	15/2/2013	108,016	210,765	102,749
8	2-B	8/2/2013	15/2/2013	108,007	162,083	54,076
9	2-B	8/2/2013	15/2/2013	108,090	137,041	28,951

Masa Total
de Muestreo

1142,844 g

1.5. Resultados S3.

Tabla 29. Coordenadas y posicionamiento de trampas en S3.

Número Trampa	Sector	Coordenadas	Punto GPS	Día de posicionamiento	Hora de posicionamiento	Día de retirada	Hora de retirada
1	3	0337119 6334890	34	30/11/2012	11:06 am	7/12/2012	8:30 am
2	3	0337084 6334858	35	30/11/2012	11:38 am	7/12/2012	8:30 am
3	3	0337113 6334847	36	30/11/2012	11:52 am	7/12/2012	8:31 am
4	3	0337085 6334828	37	30/11/2012	12:08 am	7/12/2012	8:31 am
5	3	0337127 6334816	38	30/11/2012	12:17 am	7/12/2012	8:31 am
6	3	0337119 6334787	39	30/11/2012	12:27 am	7/12/2012	8:32 am
7	3	0337136 6334748	43	04/12/2012	10:36 am	11/12/2012	10:35 am
8	3	0337139 6334734	42	04/12/2012	10:56 am	11/12/2012	10:37 am
9	3	0337154 6334650	44	04/12/2012	11:10 am	11/12/2012	10:40 am

Tabla 30. Peso Neto de trampas del S3.

Número Trampa	Sector	Día de posicionamiento	Día de pesaje	Peso Vaso (g)	Peso Vaso(g) + Arena (g)	Masa Neta (g)
1	3	30/11/2012	7/12/2012	107,998	124,549	16,551
2	3	30/11/2012	7/12/2012	108,025	136,405	28,380
3	3	30/11/2012	7/12/2012	107,989	137,393	29,403

Masa Total Acumulada	74,334
----------------------	--------

Número Trampa	Sector	Día de posicionamiento	Día de pesaje	Peso Cápsula de Petri (g)	Peso Cápsula de Petri (g) + Arena (g)	Masa Neto (g)
4	3	30/11/2012	7/12/2012	27,018	43,953	16,935
4	3	30/11/2012	7/12/2012	27,017	49,784	22,766
4	3	30/11/2012	7/12/2012	27,017	49,497	22,479
4	3	30/11/2012	7/12/2012	27,016	53,388	26,371
4	3	30/11/2012	7/12/2012	27,016	55,453	28,437
4	3	30/11/2012	7/12/2012	27,016	57,292	30,275
4	3	30/11/2012	7/12/2012	27,017	55,503	28,486
4	3	30/11/2012	7/12/2012	27,018	51,592	24,574
4	3	30/11/2012	7/12/2012	27,0168	57,047	30,030
4	3	30/11/2012	7/12/2012	27,017	53,454	26,437
Masa Total						256,79
Masa Total Acumulada						331,124

Número Trampa	Sector	Día de posicionamiento	Día de pesaje	Vaso Precipitado (g)	Vaso Precipitado (g) + Arena (g)	Masa Neta (g)
5	3	30/11/2012	7/12/2012	107,986	150,535	42,548
5	3	30/11/2012	7/12/2012	107,984	173,628	65,644
5	3	30/11/2012	7/12/2012	107,990	183,182	75,192
5	3	30/11/2012	7/12/2012	107,983	174,018	66,035
5	3	30/11/2012	7/12/2012	107,980	155,613	47,631
6	3	30/11/2012	7/12/2012	107,980	163,742	55,759
6	3	30/11/2012	7/12/2012	107,983	174,664	66,681
6	3	30/11/2012	7/12/2012	107,981	181,531	73,550
6	3	30/11/2012	7/12/2012	107,981	210,751	102,769
Masa Total						595,816

Masa Total Acumulada	926,942
----------------------	---------

Número Trampa	Sector	Día de posicionamiento	Día de pesaje	Vaso Precipitado (g)	Vaso Precipitado (g) + Arena (g)	Masa Neta (g)
7	3	04/12/2012	11/12/2012	107,989	210,157	102,167
7	3	04/12/2012	11/12/2012	107,997	186,659	78,661
7	3	04/12/2012	11/12/2012	107,984	214,317	106,332
7	3	04/12/2012	11/12/2012	107,982	219,950	111,967
7	3	04/12/2012	11/12/2012	107,983	206,468	98,485
7	3	04/12/2012	11/12/2012	107,983	188,038	80,055
Masa Total						577,667
Masa Total Acumulada						1.504,607

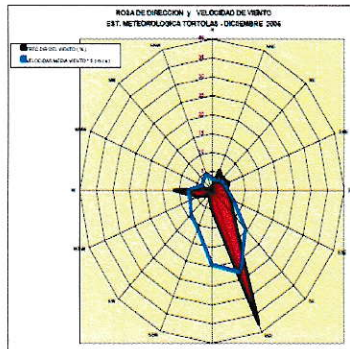
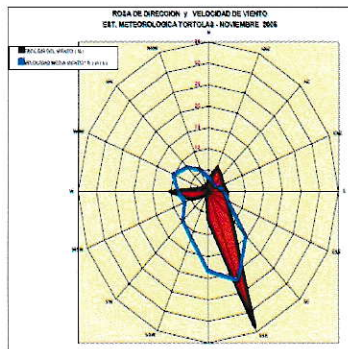
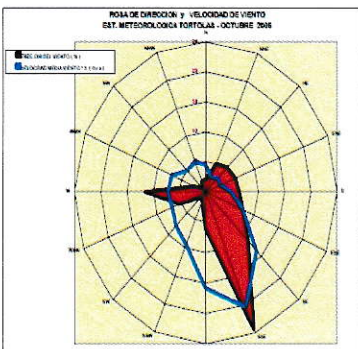
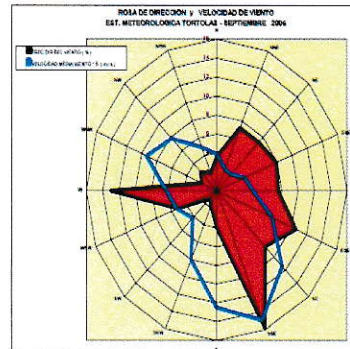
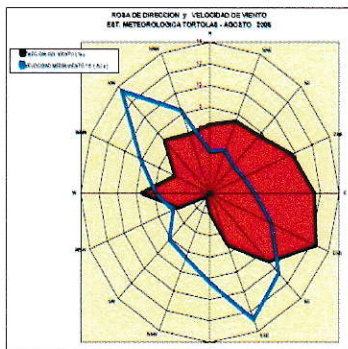
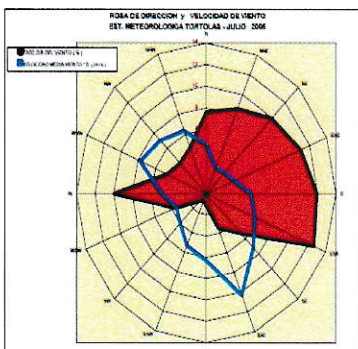
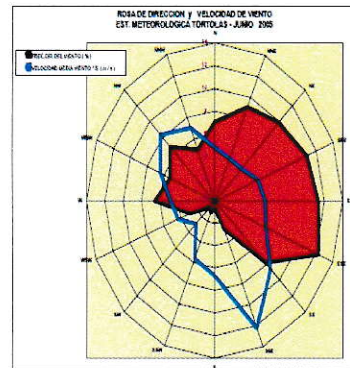
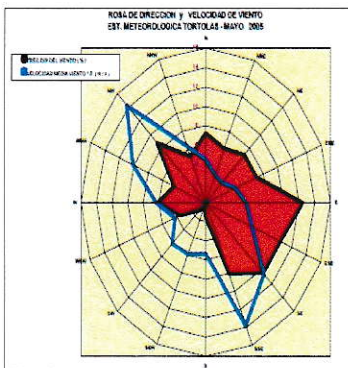
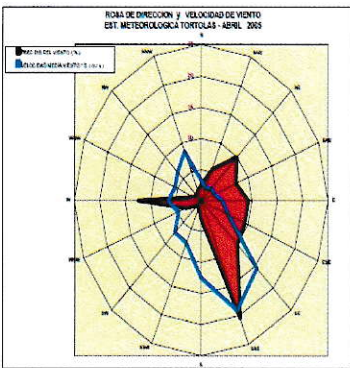
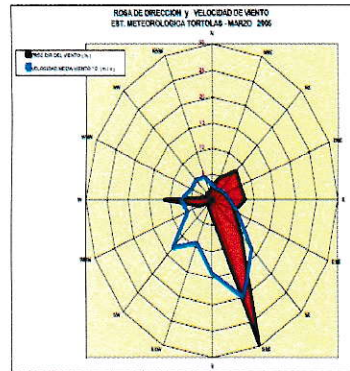
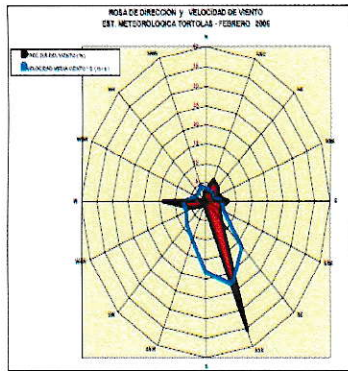
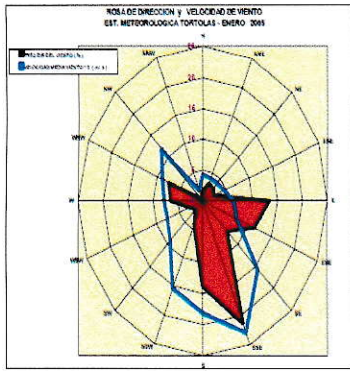
Número Trampa	Sector	Día de posicionamiento	Día de pesaje	Vaso Precipitado (g)	Vaso Precipitado (g) + Arena (g)	Masa Neto (g)
8	3	04/12/2012	11/12/2012	107,984	196,177	88,192
8	3	04/12/2012	11/12/2012	107,984	212,417	104,433
8	3	04/12/2012	11/12/2012	107,984	202,551	94,567
8	3	04/12/2012	11/12/2012	107,982	194,357	86,374
8	3	04/12/2012	11/12/2012	107,983	214,041	106,058
8	3	04/12/2012	11/12/2012	107,984	213,737	105,753
8	3	04/12/2012	11/12/2012	107,982	219,804	111,822
8	3	04/12/2012	11/12/2012	107,983	202,825	94,841
8	3	04/12/2012	11/12/2012	107,982	212,926	104,944
8	3	04/12/2012	11/12/2012	107,984	190,023	82,038
8	3	04/12/2012	11/12/2012	107,983	182,857	74,874
Masa Total						1053,9
Masa Total Acumulada						2.558,507

Número Trampa	Sector	Día de posicionamiento	Día de pesaje	Vaso Precipitado (g)	Vaso Precipitado (g) + Arena (g)	Masa Neta (g)
9	3	04/12/2012	11/12/2012	107,981	208,732	100,751
9	3	04/12/2012	11/12/2012	107,981	219,750	111,769
9	3	04/12/2012	11/12/2012	107,982	215,587	107,605
9	3	04/12/2012	11/12/2012	107,981	208,732	100,751
9	3	04/12/2012	11/12/2012	107,981	219,750	111,769
Masa Total						320,125
Masa Total Acumulada						2.878,632
Peso Total De Muestreo						2.878,632

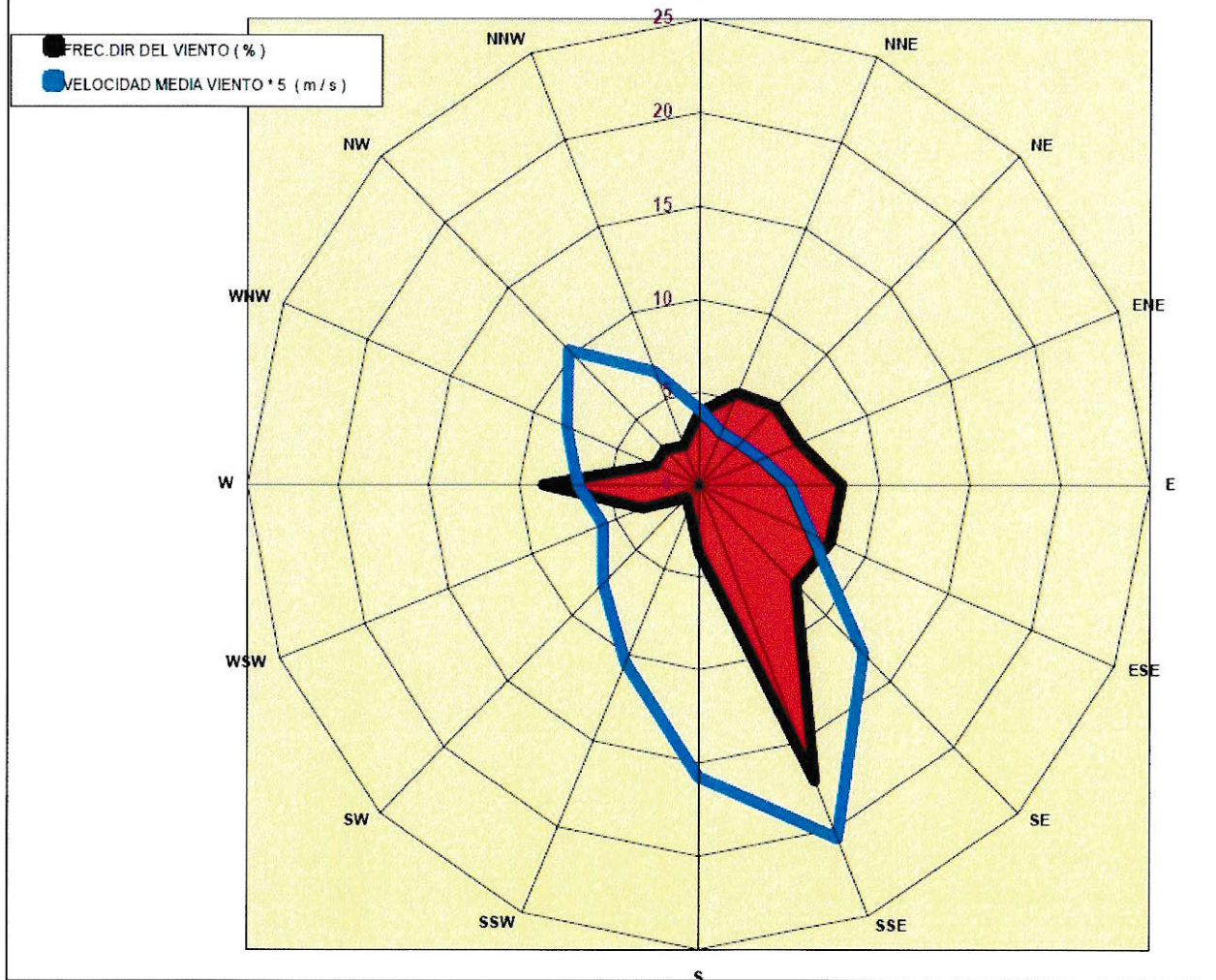
ANEXO C

Antecedentes de factores relevantes que afectan la erosión eólica del Tranque de relave Las Tórtolas

- Rosas de los vientos de cada mes del año 2005
- Rosa del viento total del año 2005
- Gráfico Temperatura y Velocidad Máxima del viento del año 2007
- Gráficos de Temperatura y Velocidad máxima del viento en el Tranque de relave Las Tórtolas (años 2010, 2011 y 2012)



ROSA DE DIRECCION y VELOCIDAD DE VIENTO
EST. METEOROLOGICA TORTOLAS - ANUAL 2005



A continuación se analizan las temperaturas y las velocidades máximas del viento del año 2007, representativo para describir la relación entre la temperatura y la intensidad de los vientos. Obtenidas de la estación meteorológica del Tranque de relave Las Tórtolas.

En las Figuras 88 y 89 se concluye una relación entre la temperatura y la velocidad de los vientos. La forma de V indica una relación entre las estaciones del año, donde las máximas se encuentran en el trimestre de verano y las mínimas en el trimestre de invierno. Ahora bien, se observa que en las fechas con máximo valor de temperatura 12 de enero, 18 de noviembre y 10 de diciembre se obtienen a la vez los valores máximos para la velocidad de los vientos. En promedio, los valores más altos de velocidad de los vientos son del rango de 5,05-5,41 m/s, para las temperaturas desde 32,99-34,93 C°.

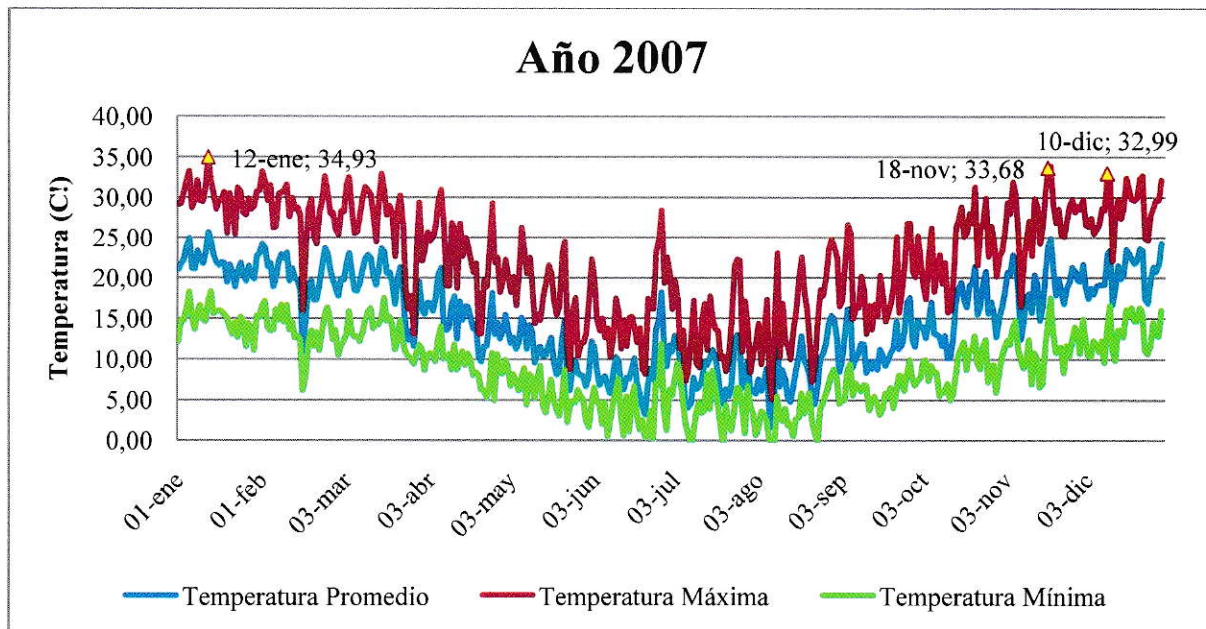


Figura 87. Temperaturas máximas, mínimas y promedio del año 2007.

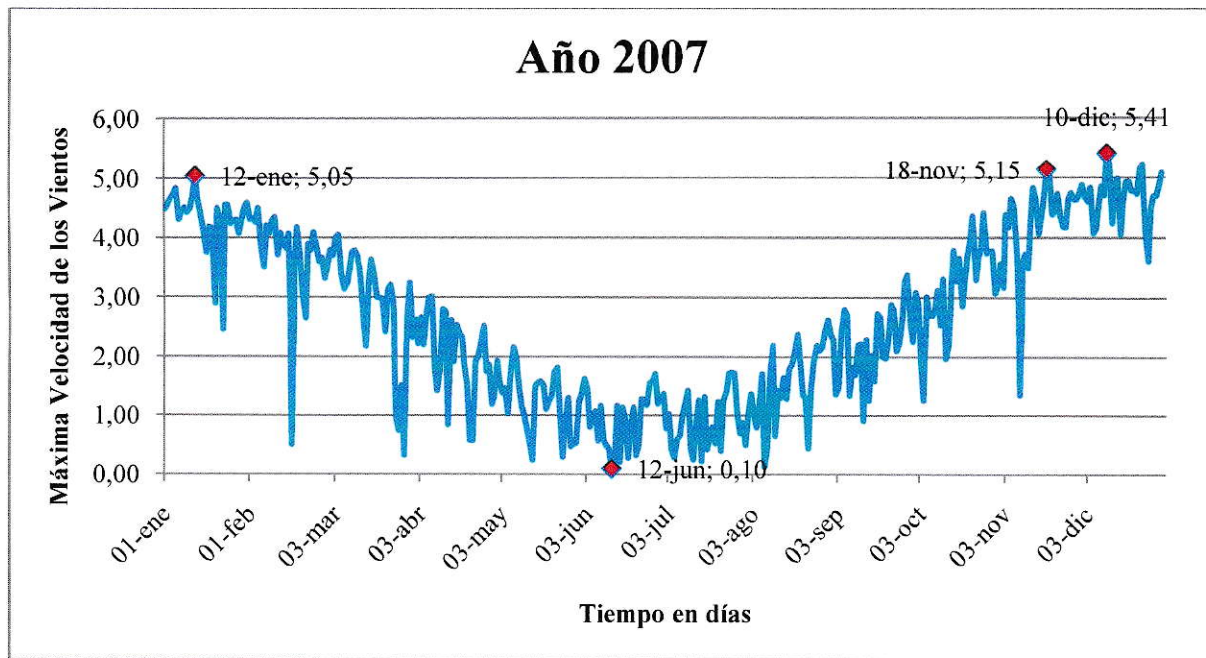


Figura 88. Máxima velocidad de los vientos del año 2007.

A continuación se muestran gráficos de las temperaturas de los años 2010-2012 y las velocidades máximas del viento en esos mismos años. Se vuelve a representar la relación existente entre estos dos parámetros. Existe un comportamiento parecido, en forma de V, donde las máximas y mínimas de ambos siguen un comportamiento creciente y decreciente, siendo los valores mínimos en el trimestre de invierno y los máximos en el trimestre de verano.

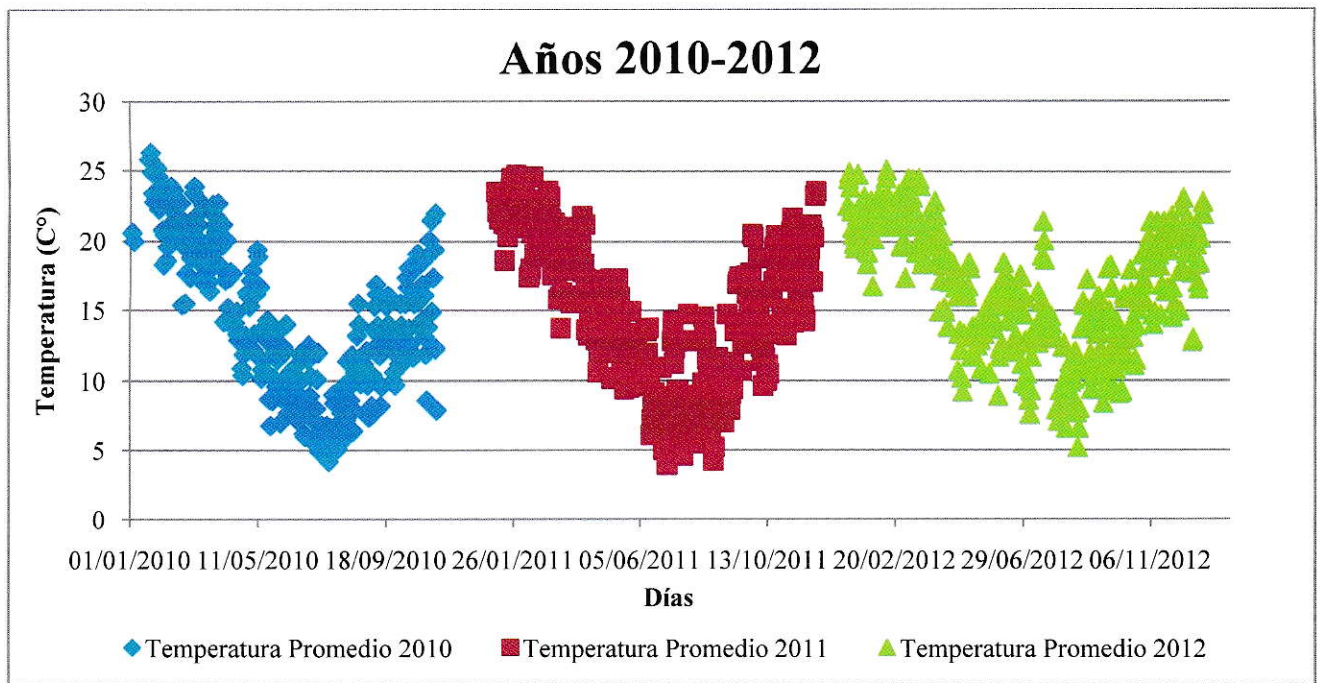


Figura 89. Temperaturas Promedio de los años 2010-2012.

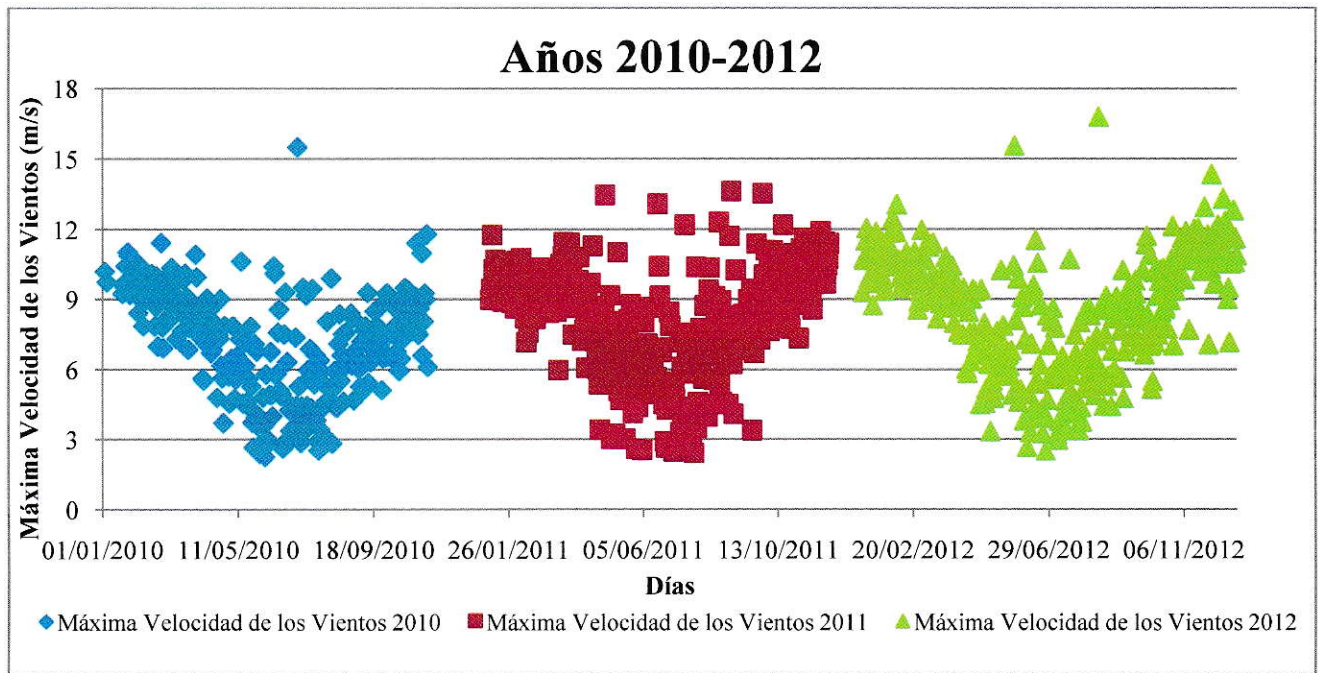


Figura 90. Máxima Velocidad de los Vientos de los años 2010-2012.

ANEXO D

Material Particulado

- Gráficos de Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) v/s Tiempo (Hora) de las mediciones de material particulado
- Tablas con los valores de moda, máxima, mínima y promedio de las mediciones de material particulado.

2. GRÁFICOS Y TABLAS DE LAS MEDICIONES DE MATERIAL PARTICULADO.

A continuación se muestran los gráficos de Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en función del tiempo (Hora) de los diferentes sectores muestreados. Aquellos sectores que se determinaron como sectores de calma, S1-A y S1-B sólo se muestra un gráfico correspondiente a las concentraciones obtenidas de las partículas (PST, PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ y PM_1). Para los sectores problemáticos se muestra un gráfico con todas las mediciones de partículas y 4 gráficos con las mediciones independientes de material particulado.

2.1. Mediciones de material particulado en S1-A.

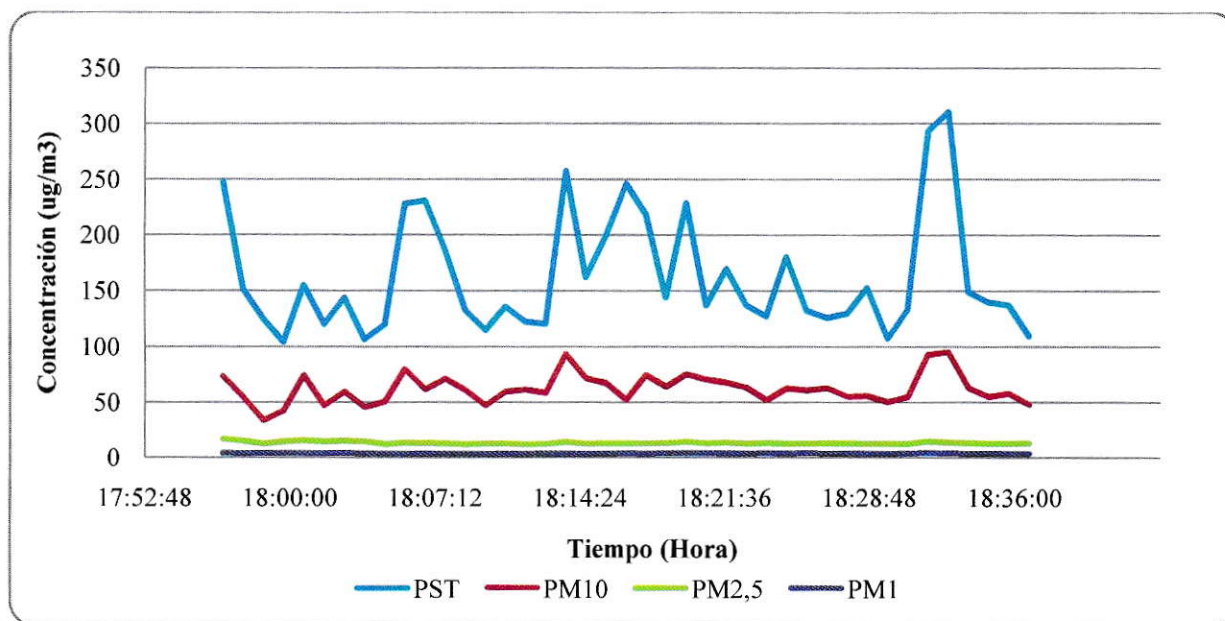


Figura 91. Medición de material particulado PST, PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ y PM_1 del día 14/1/2013 desde las 17:56 horas hasta las 18:36 horas en el S1-A.

Tabla 31. Estadísticas de la medición del día 14/1/2013 desde las 17:56 horas hasta las 18:36 horas en el S1-A.

	PST	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁
Moda	-	74,000	14,890	3,490
Máxima	310,600	95,100	16,730	3,990
Mínima	104,200	33,500	11,810	3,190
Promedio	162,800	61,846	13,062	3,544

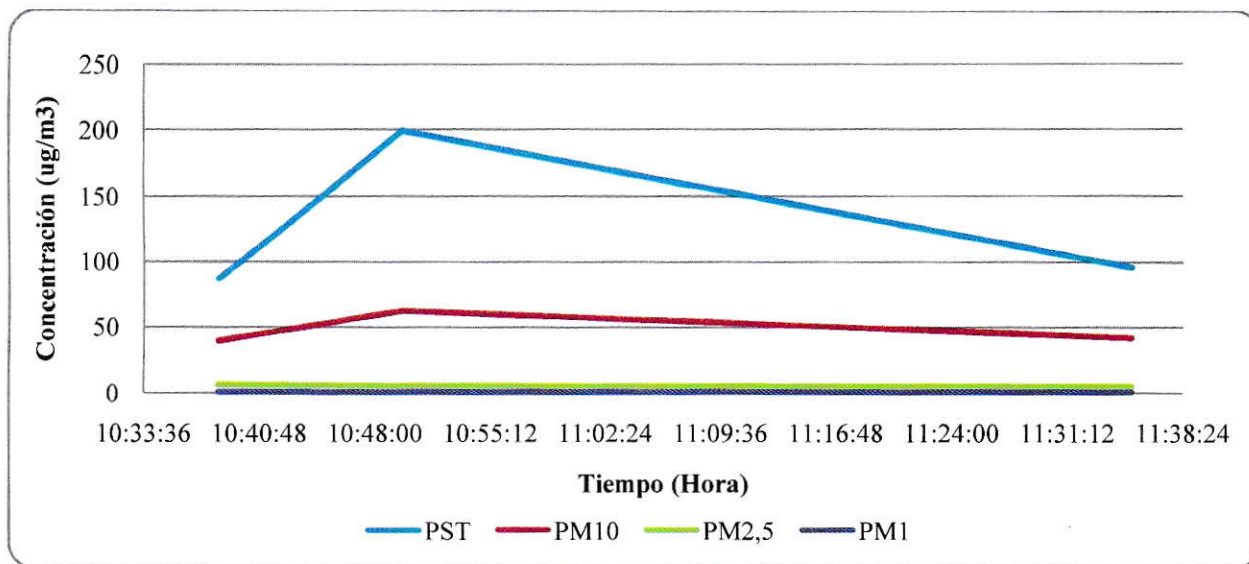


Figura 92. Medición de material particulado PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ del día 9/1/2013 a las 10:38 horas, 10:49 horas, 11:35 horas, en el S1-A.

Tabla 32. Estadísticas de la medición del día 9/1/2013 a las 10:38 horas, 10:49 horas, 11:35 horas, en el S1-A.

	PST	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁
Moda	-	-	-	0,750
Máxima	199,300	61,800	6,390	0,830
Mínima	86,800	39,200	4,650	0,750
Promedio	127,466	47,633	5,450	0,776

2.2. Mediciones de material particulado en S1-B.

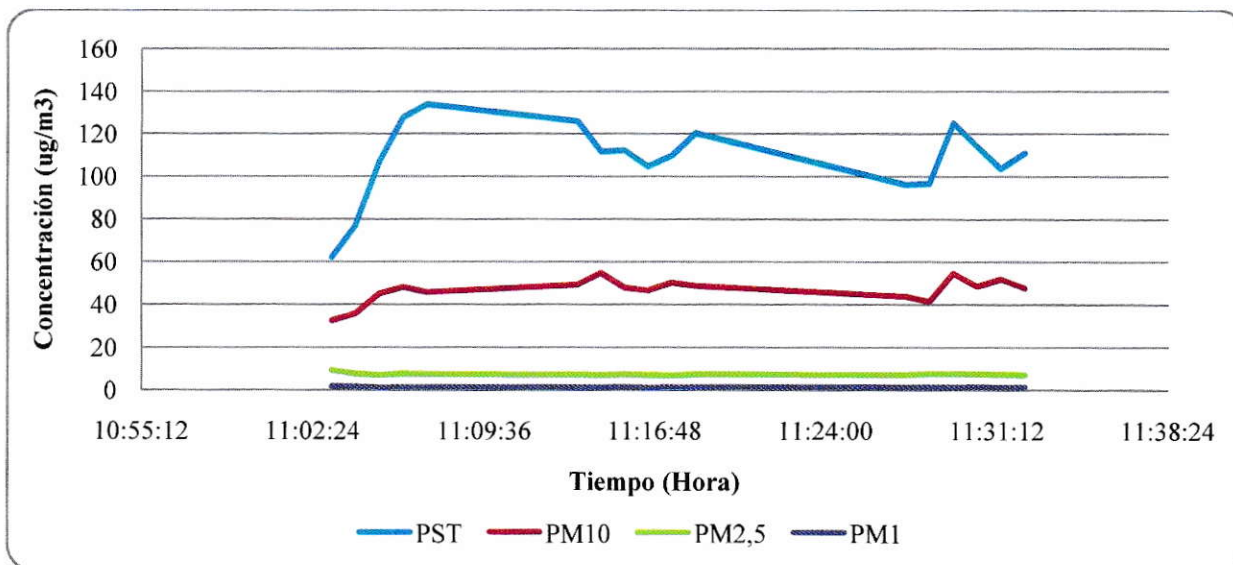


Figura 93. Medición de material particulado PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ del día 10/1/2013 desde las 10:03 horas hasta las 11:32 horas en el S1-B.

Tabla 33. Estadísticas de la medición del día 10/1/2013 desde las 10:03 horas hasta las 11:32 horas en el S1-B.

	PST	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁
Moda	-	-	-	1,210
Máxima	134,000	54,600	9,060	1,540
Mínima	62,100	32,300	6,740	1,020
Promedio	108,305	46,376	7,246	1,206

2.3. Mediciones de material particulado en S2-A.

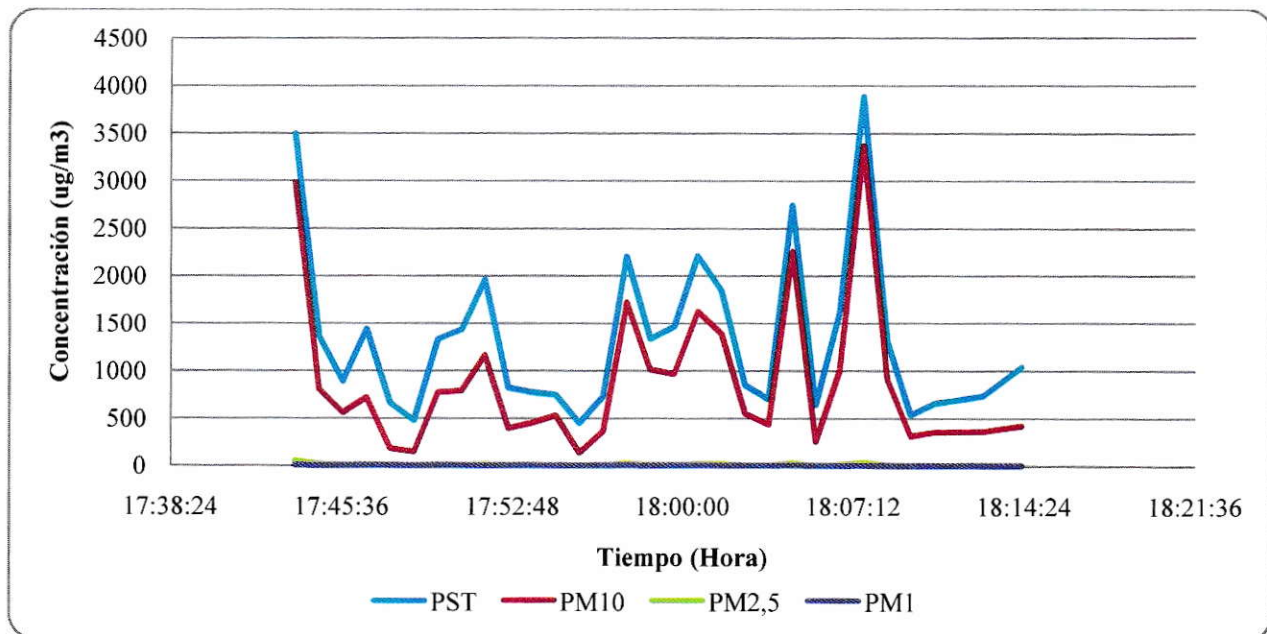


Figura 94. Medición de material particulado PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ del día 16/1/2013 desde las 17:43 horas hasta las 18:14 horas en el S2-A.

Tabla 34. Estadísticas de la medición del día 16/1/2013 desde las 17:43 horas hasta las 18:14 horas en el S2-A.

	PST	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁
Moda	-	-	10,590	2,410
Máxima	3884,100	3370,000	51,130	5,530
Mínima	455,600	135,600	8,480	2,100
Promedio	1346,617	899,0867	16,774	2,947

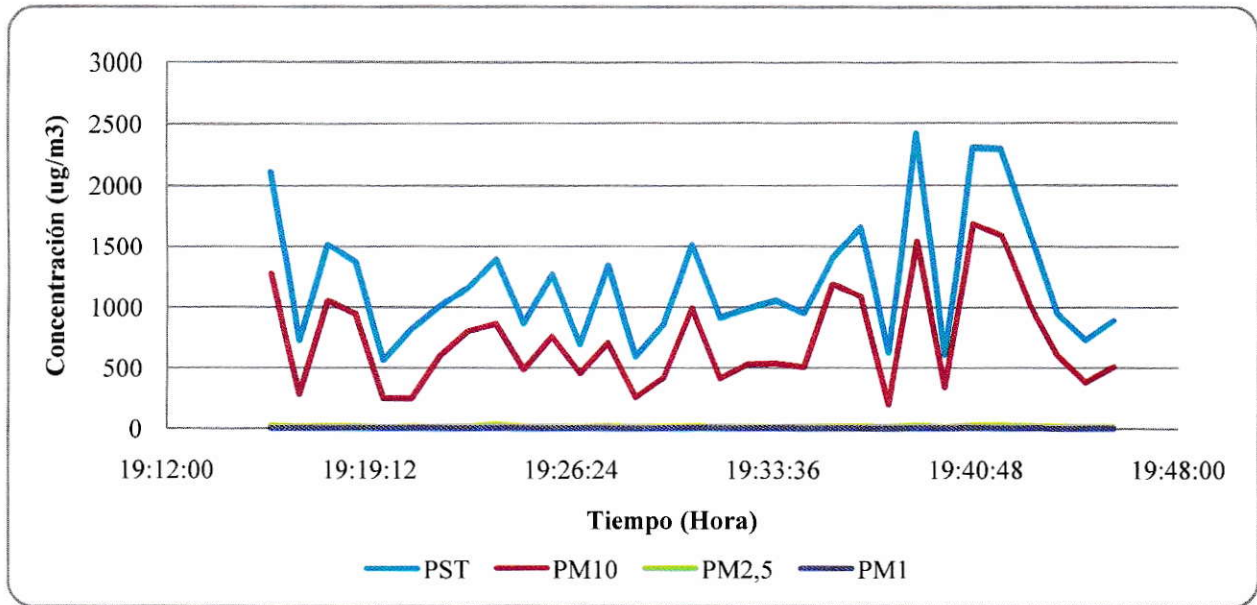


Figura 95. Medición de material particulado PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ del día 16/1/2013 desde las 19:15 horas hasta las 19:45 horas en el S2-A.

Tabla 35. Estadísticas de la medición del día 16/1/2013 desde las 17:43 horas hasta las 18:14 horas en el S2-A.

	PST	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁
Moda	-	-	-	3,760
Máxima	2416,100	1690,600	32,350	5,490
Mínima	566,600	196,200	12,660	3,520
Promedio	1203,645	725,567	17,649	4,172

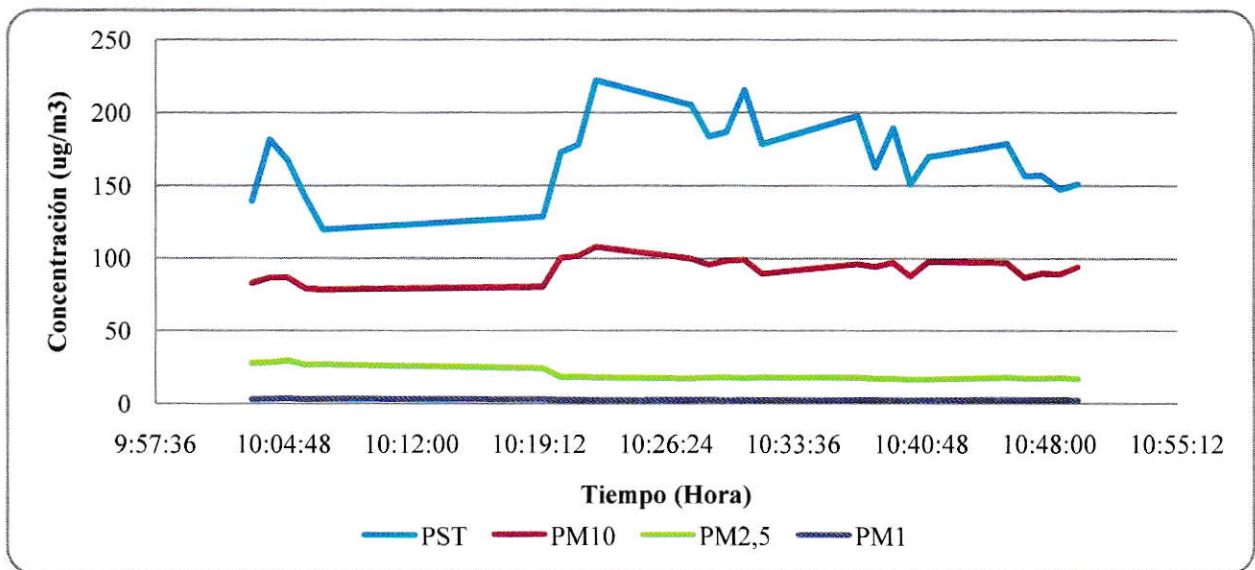


Figura 96. Medición de material particulado PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ del día 11/1/2013 desde las 10:03 horas hasta las 10:49 horas en el S2-A.

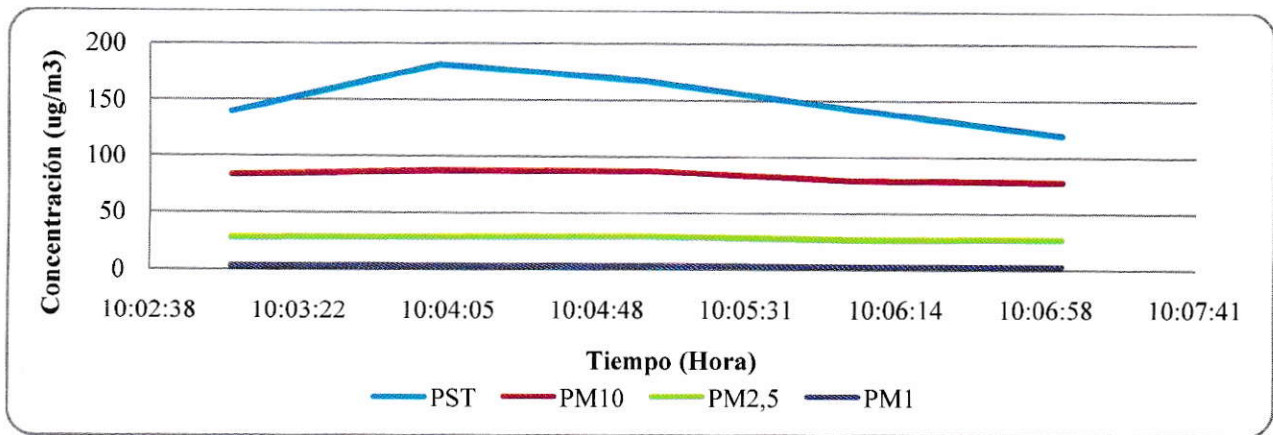


Figura 97. Medición de material particulado PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ del día 11/1/2013 desde las 10:03 horas hasta las 10:07 horas en el S2-A.

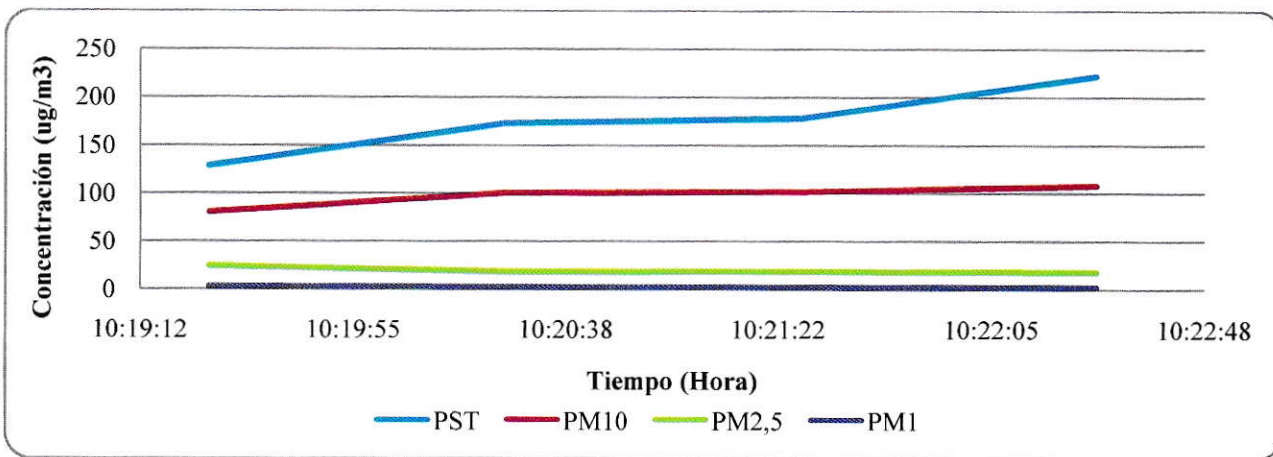


Figura 98. Medición de material particulado PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ del día 11/1/2013 desde las 10:19 horas hasta las 10:22 horas en el S2-A.

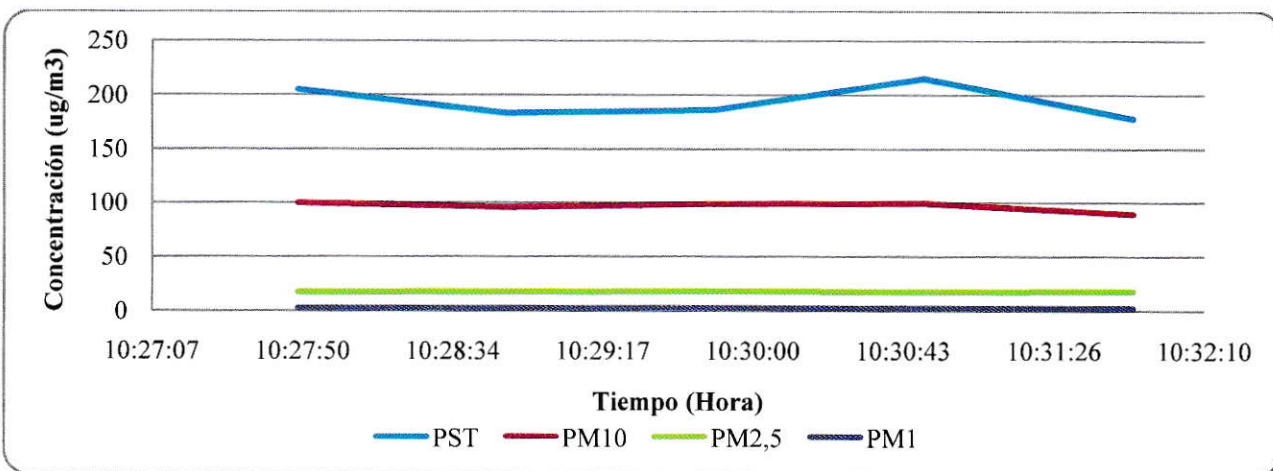


Figura 99. Medición de material particulado PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ del día 11/1/2013 desde las 10:27 horas hasta las 10:31 horas en el S2-A.

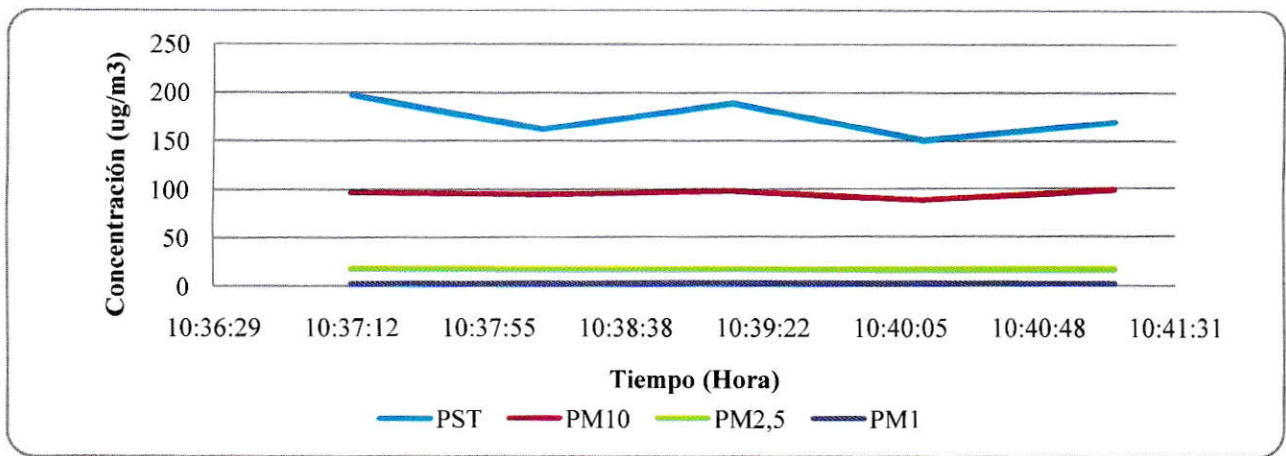


Figura 100. Medición de material particulado PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ del día 11/1/2013 desde las 10:37 horas hasta las 10:41 horas en el S2-A.

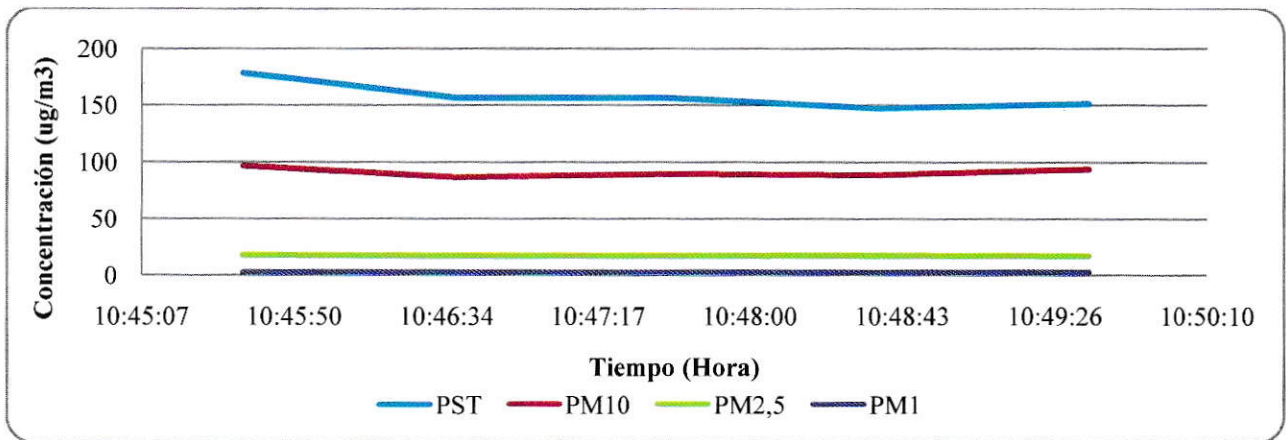


Figura 101. Medición de material particulado PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ del día 11/1/2013 desde las 10:45 horas hasta las 10:49 horas en el S2-A.

Tabla 36. Estadísticas de la medición del día 11/1/2013 desde las 10:45 horas hasta las 10:49 horas en el sector 2-A.

	PST	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁
Moda	-	86,500	-	2,240
Máxima	222,200	107,500	29,050	3,530
Mínima	119,700	78,100	16,450	2,120
Promedio	170,087	92,025	19,705	2,485

2.4. Mediciones de material particulado en S2-B.

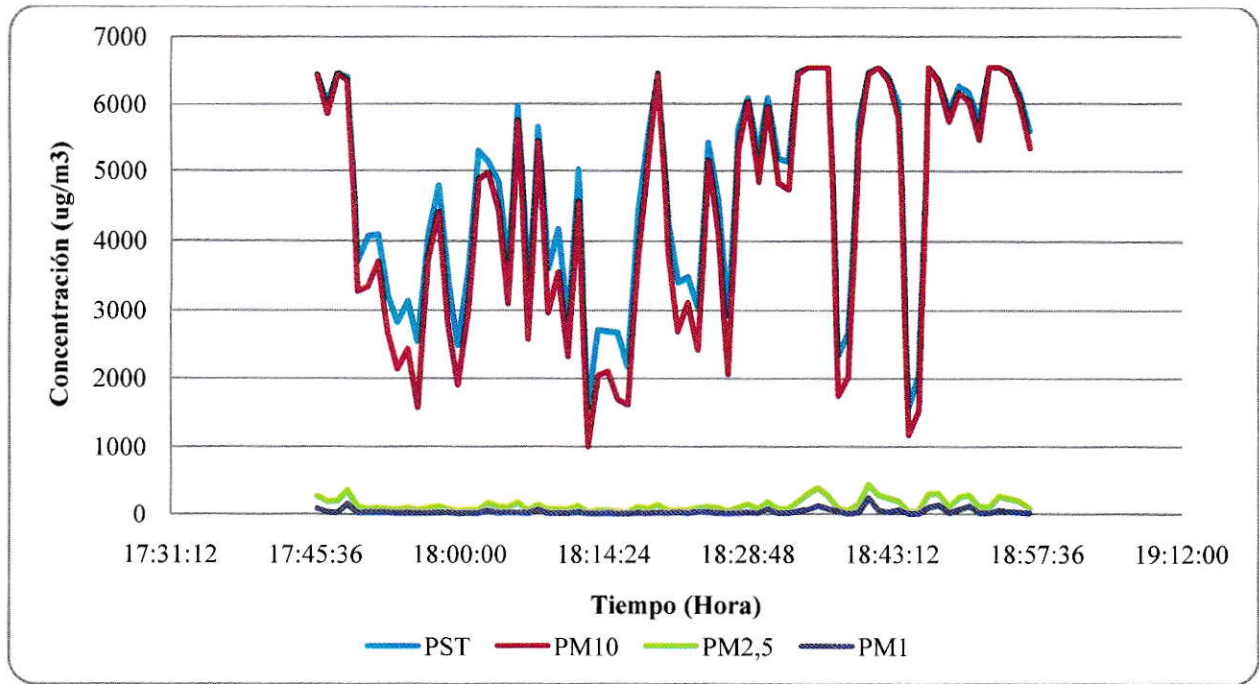


Figura 102. Medición de material particulado PST, PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ y PM_1 del día 17/1/2013 desde las 17:45 horas hasta las 18:56 horas en el S2-B.

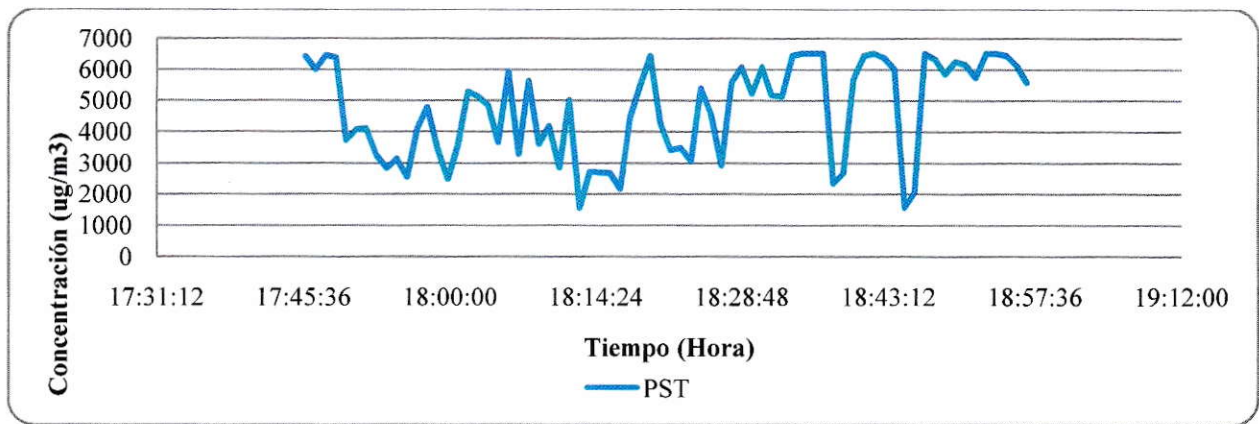


Figura 103. Medición de partículas suspendidas totales, PST, del día 17/1/2013 desde las 17:45 horas hasta las 18:56 horas en el S2-B.

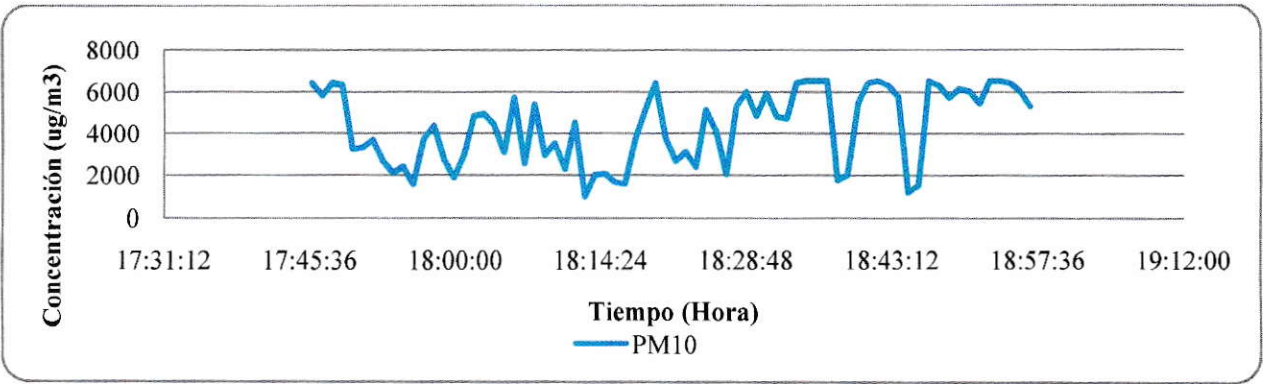


Figura 104. Medición de material particulado grueso, PM_{10} , del día 17/1/2013 desde las 17:45 horas hasta las 18:56 horas en el S2-B.

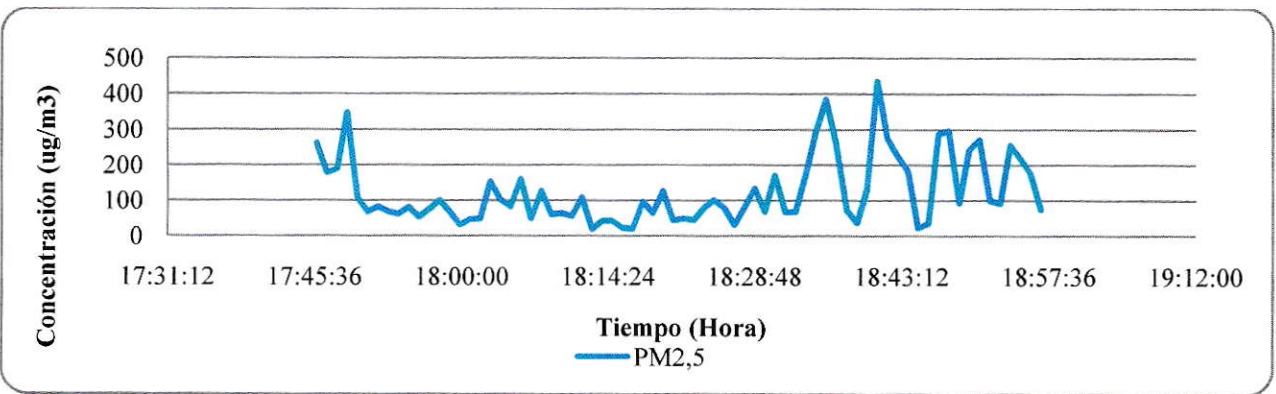


Figura 105. Medición de material particulado fino, $PM_{2,5}$, día 17/1/2013 desde las 17:45 horas hasta las 18:56 horas en el S2-B.

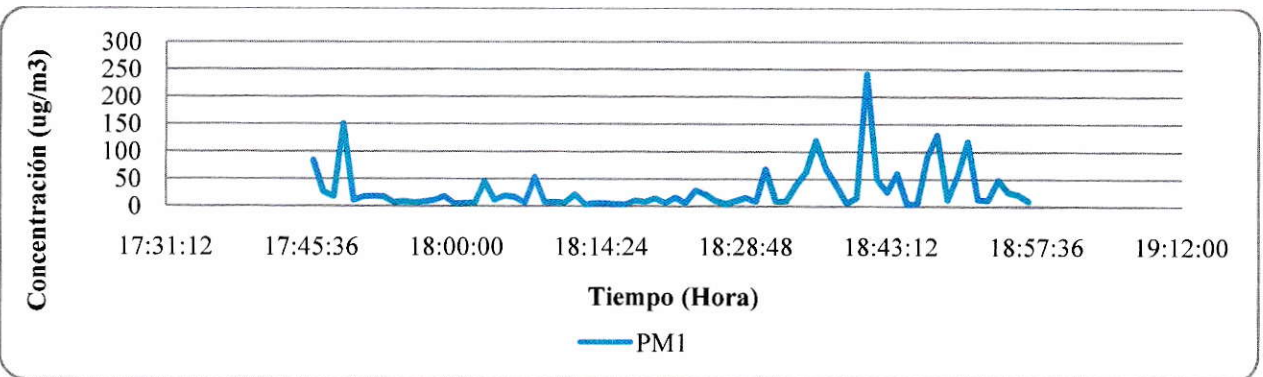


Figura 106. Medición de material particulado fino, PM_1 , del día 17/1/2013 desde las 17:45 horas hasta las 18:56 horas en el S2-B.

Tabla 37. Estadísticas de la medición del día 17/1/2013 desde las 17:45 horas hasta las 18:56 horas en el S2-B.

	PST	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁
Moda	6527,900	6527,900	-	-
Máxima	6527,900	6527,900	434,980	242,380
Mínima	1561,500	996,800	20,040	3,980
Promedio	4714,700	4348,489	124,458	30,467

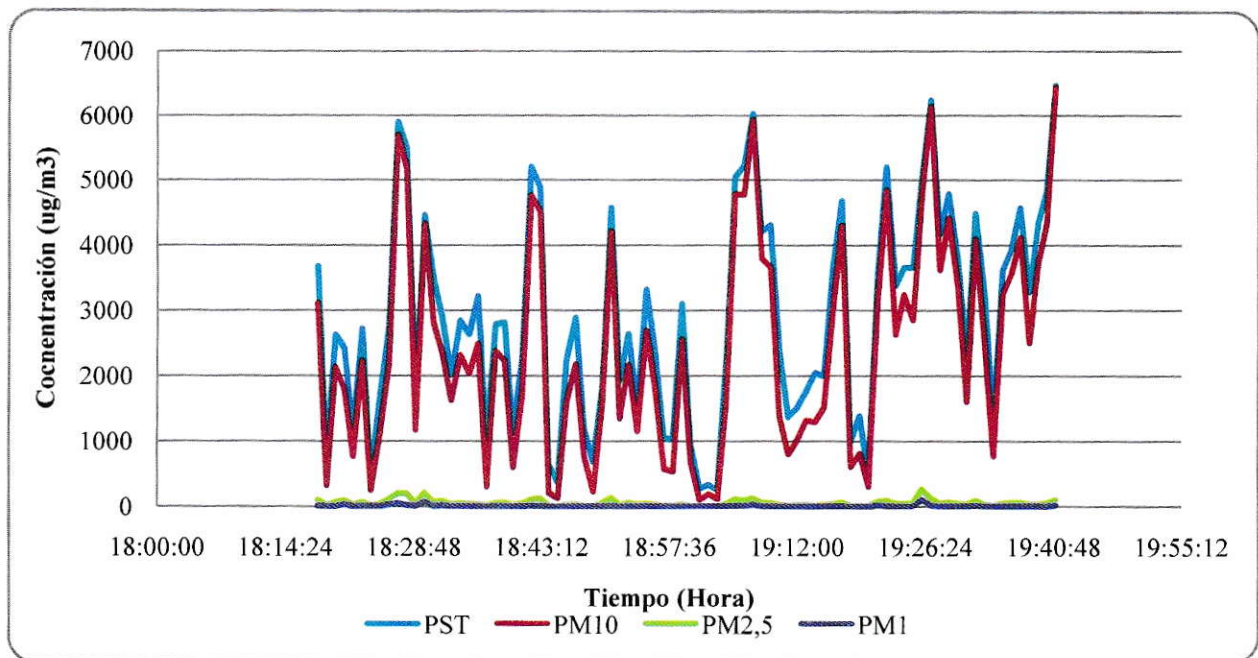


Figura 107. Medición de material particulado PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ del día 30/1/2013 desde las 18:18 horas hasta las 19:41 horas en el S2-B.

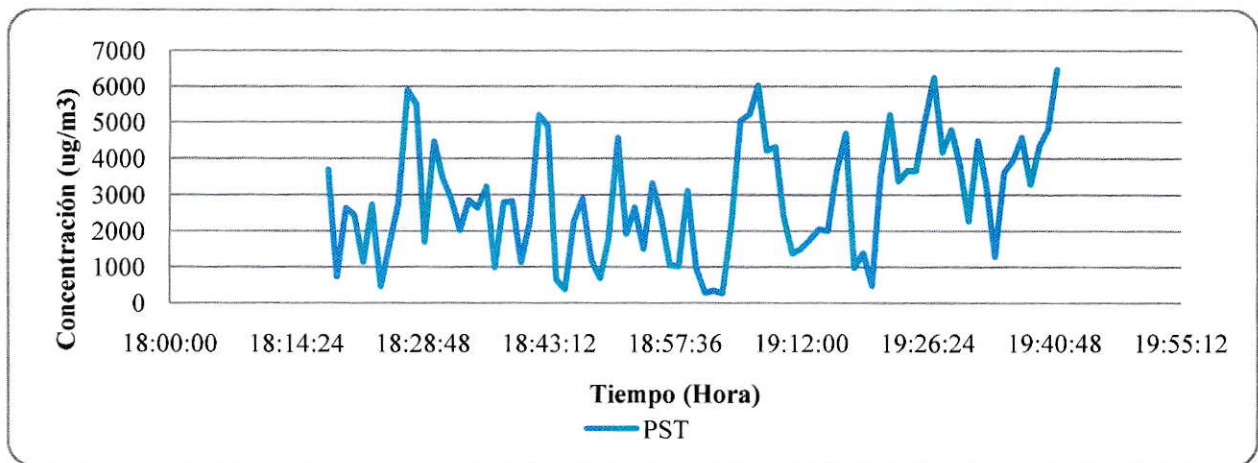


Figura 108. Medición de partículas suspendidas totales, PST, del día 17/1/2013 desde las 17:45 horas hasta las 18:56 horas en el S2-B.

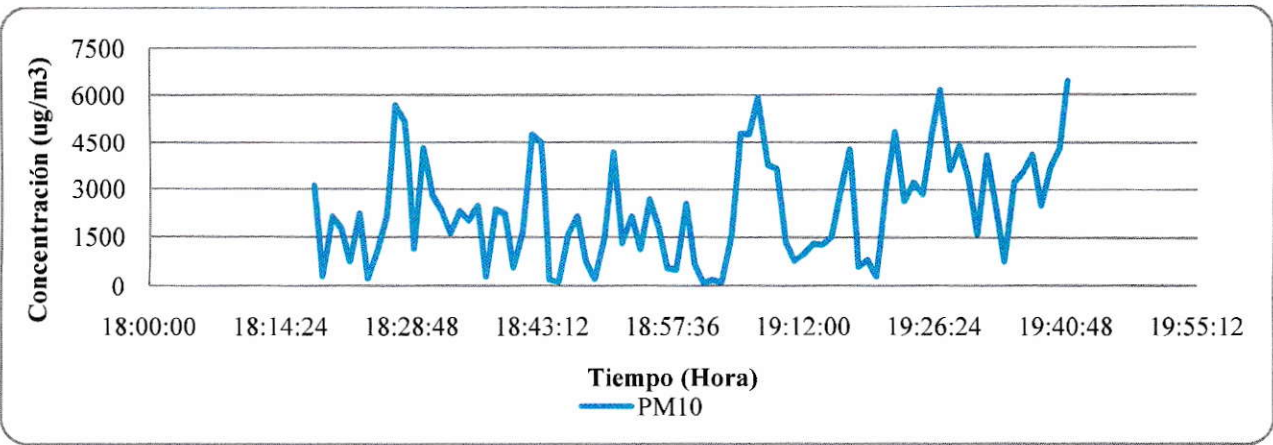


Figura 109. Medición de material particulado grueso, PM_{10} , del día 17/1/2013 desde las 17:45 horas hasta las 18:56 horas en el S2-B.

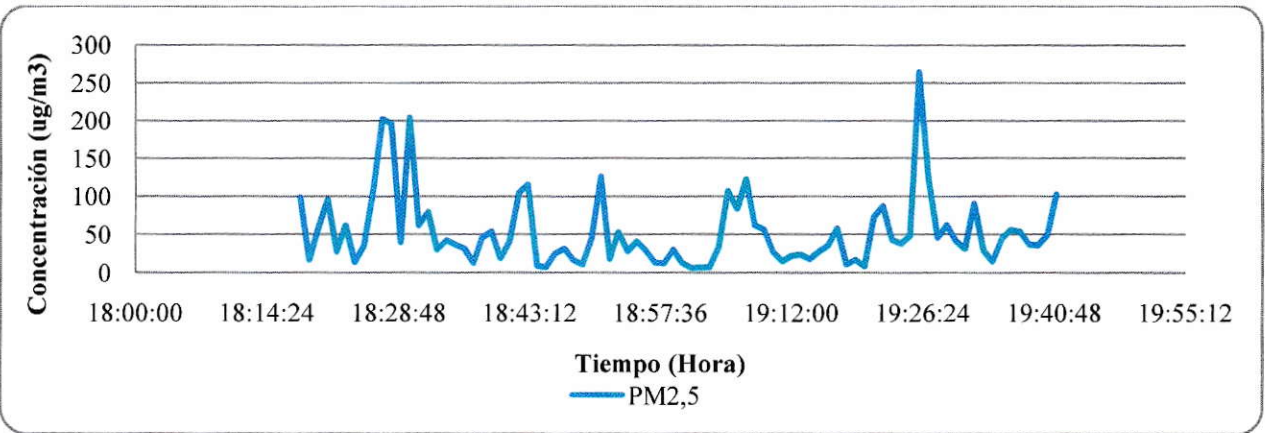


Figura 110. Medición de material particulado fino, $PM_{2,5}$, del día 17/1/2013 desde las 17:45 horas hasta las 18:56 horas en el S2-B.

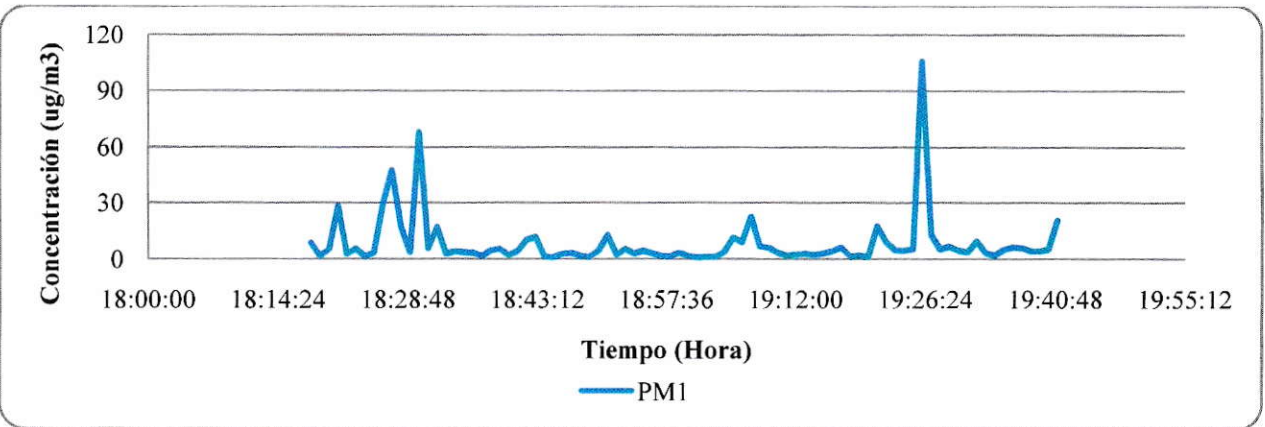


Figura 111. Medición de material particulado fino, PM_1 , del día 17/1/2013 desde las 17:45 horas hasta las 18:56 horas en el S2-B.

Tabla 38. Estadísticas de la medición del día 17/1/2013 desde las 17:45 horas hasta las 18:56 horas en el S2-B.

	PST	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁
Moda	-	-	-	3,260
Máxima	6471,800	6435,800	264,810	105,750
Mínima	261,100	92,700	5,880	0,930
Promedio	2870,908	2399,775	53,102	8,309

2.5. Mediciones de material particulado en S3.

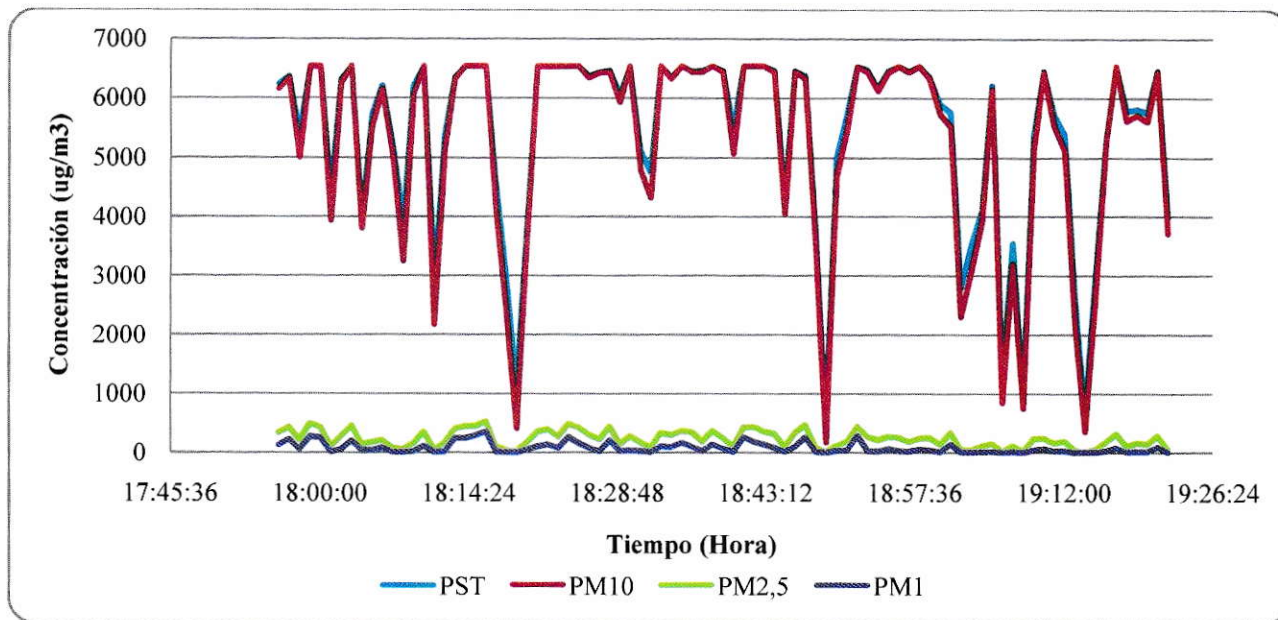


Figura 112. Medición de material particulado PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ del día 15/1/2013 desde las 17:56 horas hasta las 19:22 horas en el S3.

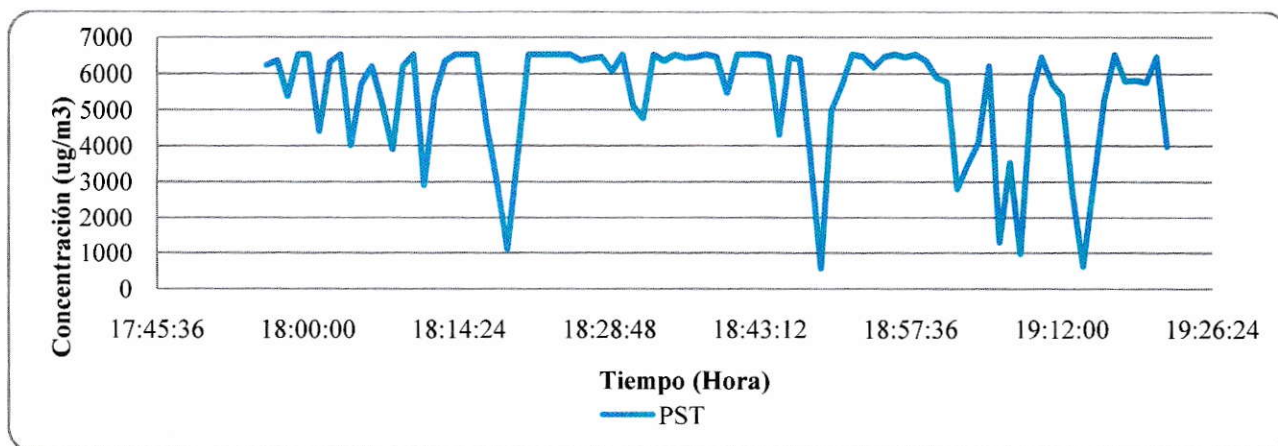


Figura 113. Medición de partículas suspendidas totales, PST, del día 15/1/2013 desde las 17:56 horas hasta las 19:22 horas en el S3.

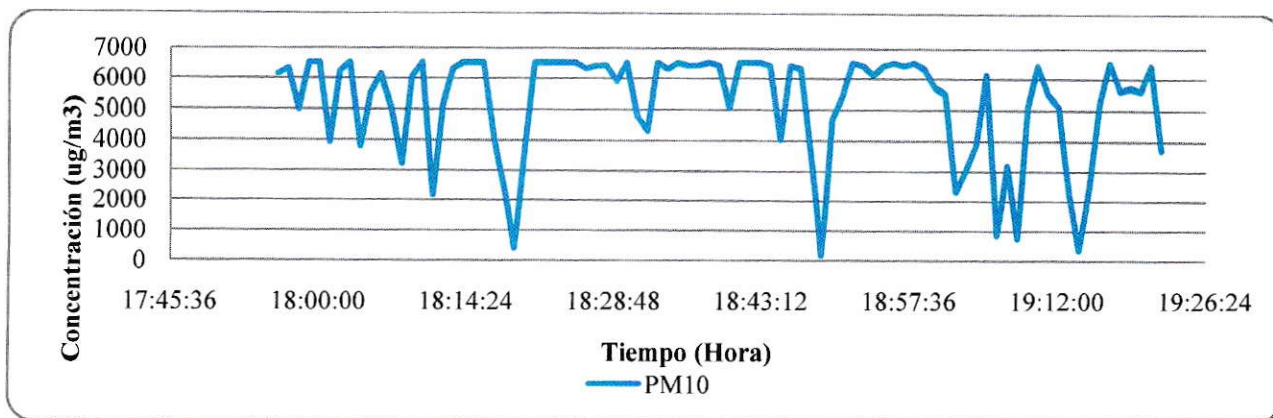


Figura 114. Medición de material particulado grueso, PM_{10} , del día 15/1/2013 desde las 17:56 horas hasta las 19:22 horas en el S3.

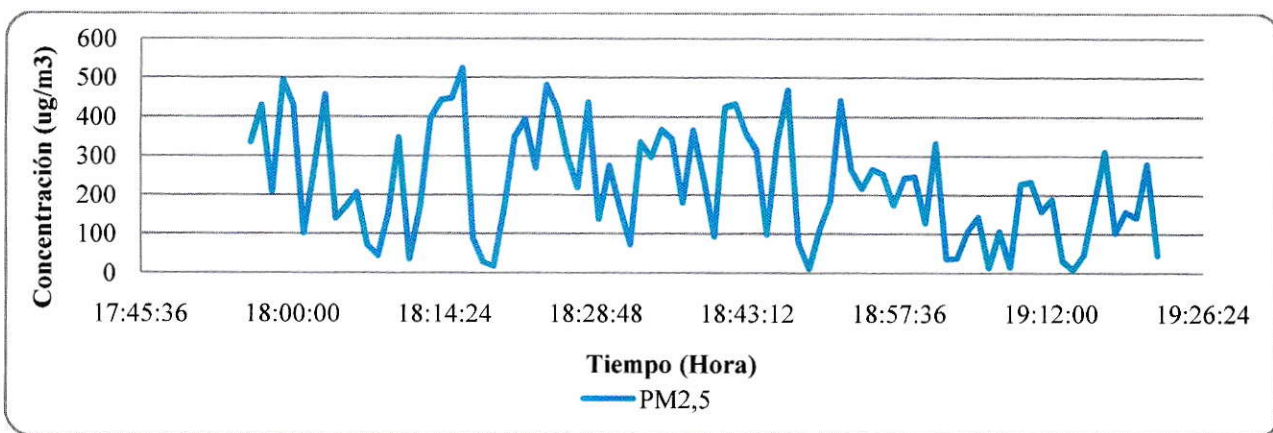


Figura 115. Medición de material particulado fino, $PM_{2,5}$, del día 15/1/2013 desde las 17:56 horas hasta las 19:22 horas en el S3.

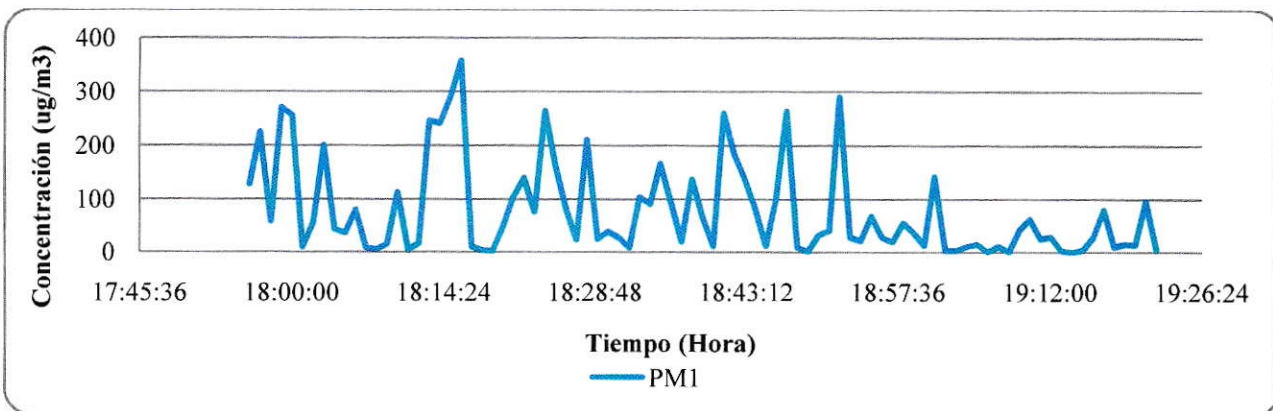


Figura 116. Medición de material particulado fino, PM_1 , del día 15/1/2013 desde las 17:56 horas hasta las 19:22 horas en el S3.

Tabla 39. Estadísticas de la medición del día 15/1/2013 desde las 17:56 horas hasta las 19:22 horas en el S3.

	PST	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁
Moda	6527,900	6527,900	-	2,990
Máxima	6527,900	6527,900	524,740	357,290
Mínima	260,200	96,300	8,300	0,250
Promedio	4974,811	4762,505	206,820	71,001

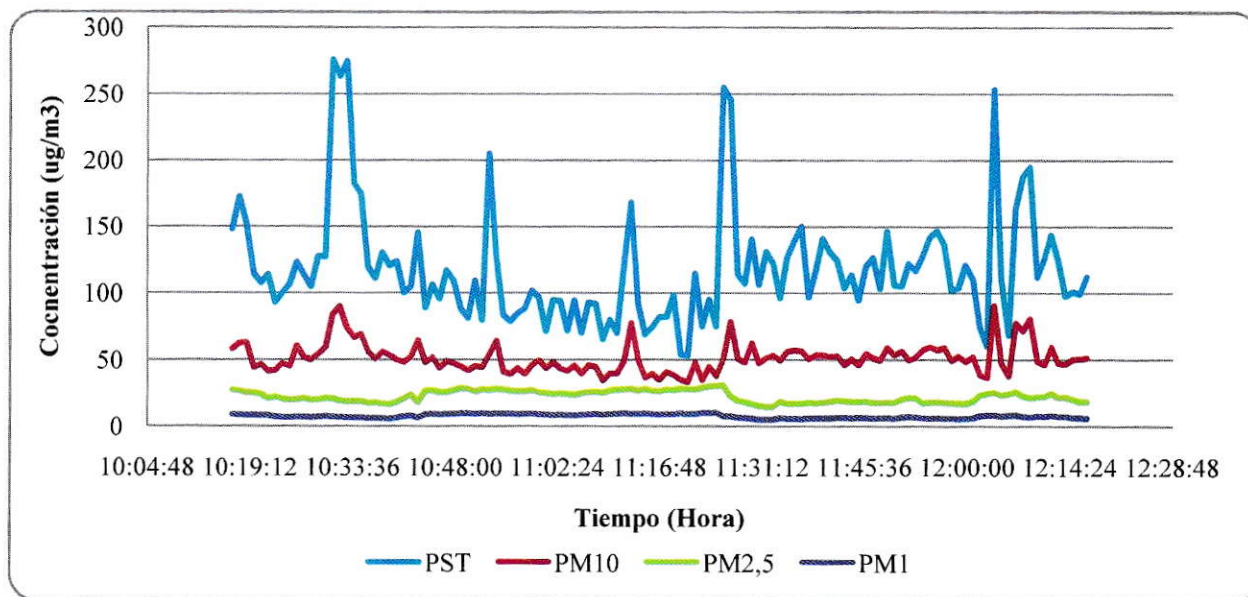


Figura 117. Medición de material particulado PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ del día 23/1/2013 desde las 10:16 horas hasta las 12:16 horas en el S3.

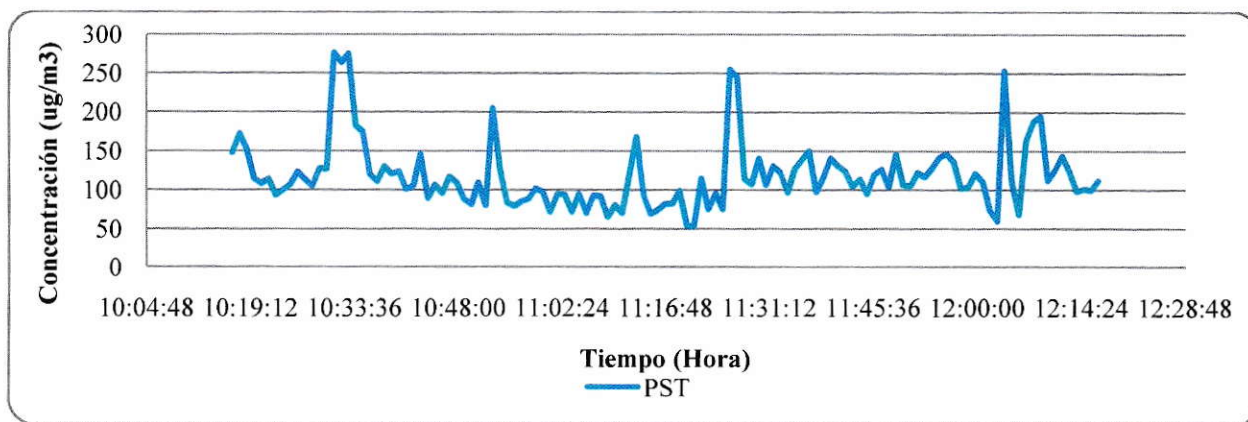


Figura 118. Medición de partículas suspendidas totales, PST, del día 23/1/2013 desde las 10:16 horas hasta las 12:16 horas en el S3.

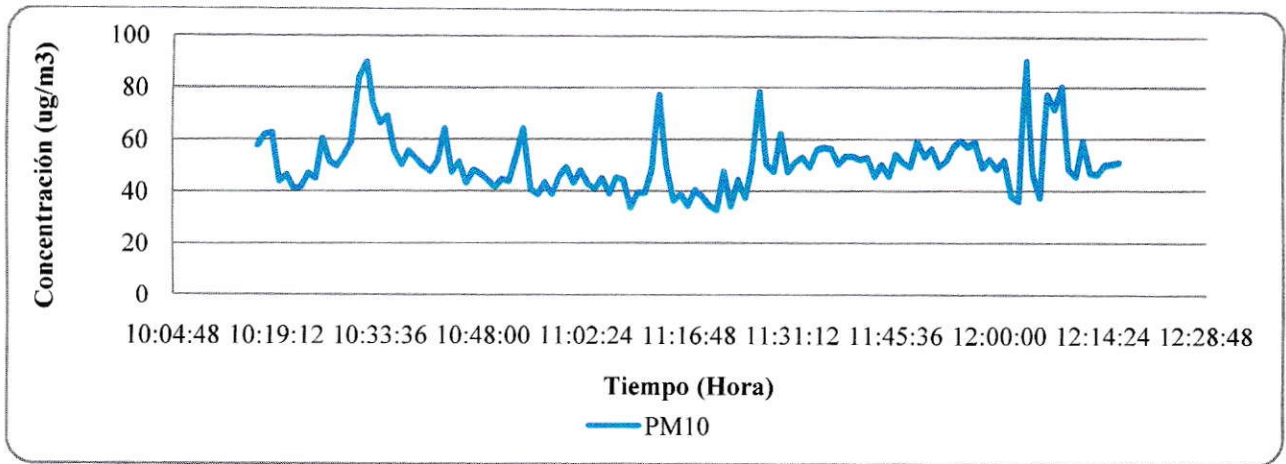


Figura 119. Medición de material particulado grueso, PM_{10} , del día 23/1/2013 desde las 10:16 horas hasta las 12:16 horas en el S3.

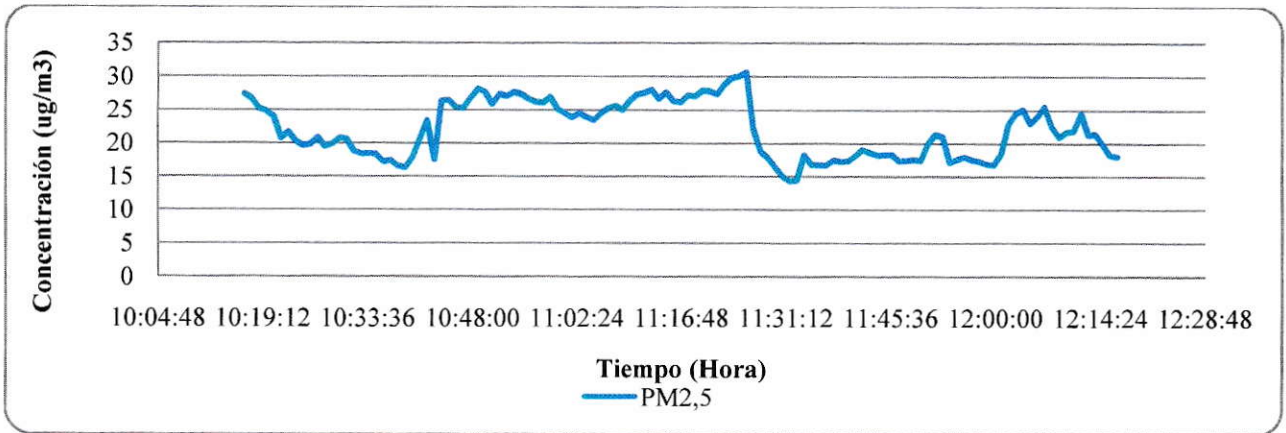


Figura 120. Medición de material particulado fino, $PM_{2,5}$, del día 23/1/2013 desde las 10:16 horas hasta las 12:16 horas en el S3.

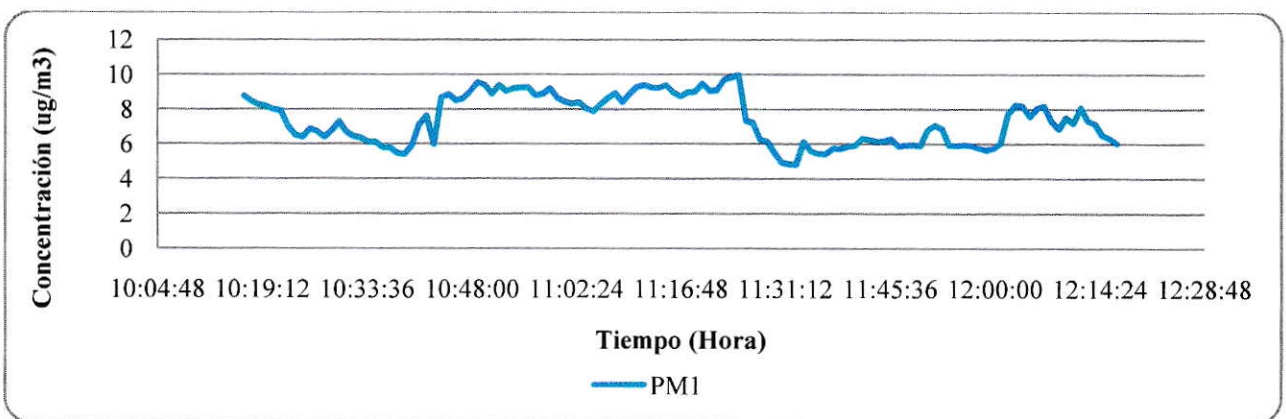


Figura 121. Medición de material particulado fino, PM_1 , del día 23/1/2013 desde las 10:16 horas hasta las 12:16 horas en el S3.

Tabla 40. Estadísticas de la medición del día 23/1/2013 desde las 10:16 horas hasta las 12:16 horas en el S3.

	PST	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁
Moda	114,100	47,000	26,690	5,930
Máxima	276,000	90,600	30,690	9,960
Mínima	53,100	32,800	14,340	4,820
Promedio	118,712	51,044	22,155	7,401

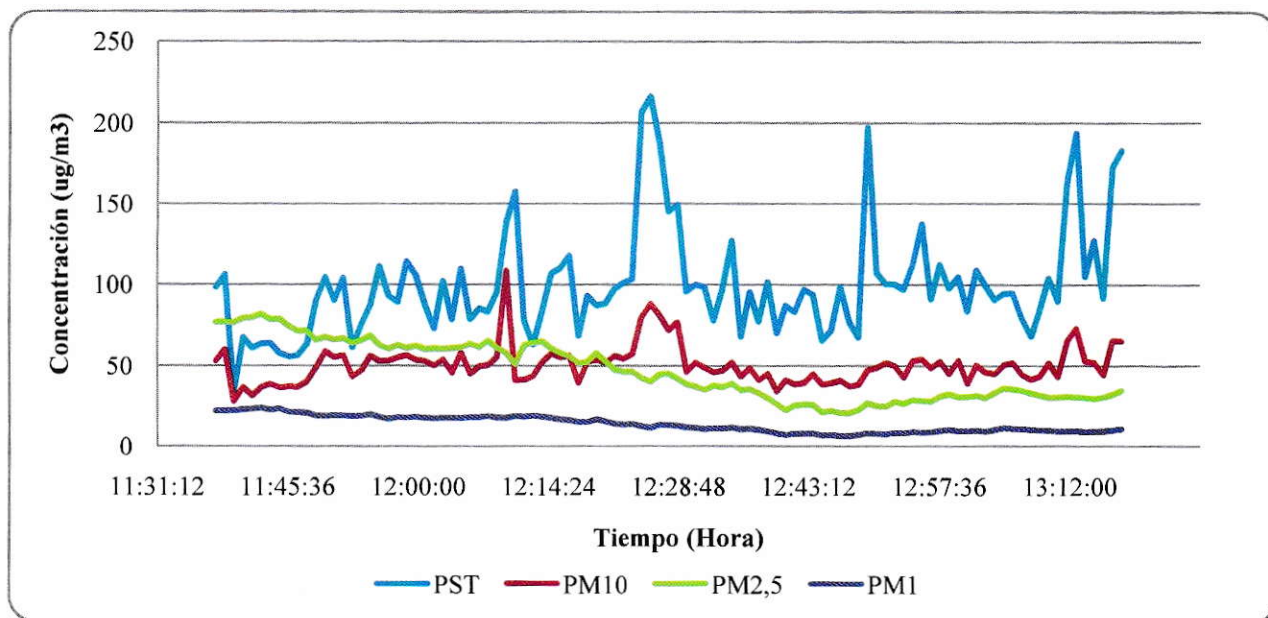


Figura 122. Medición de material particulado PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ del día 24/1/2013 desde las 11:37 horas hasta las 13:17 horas en el S3.

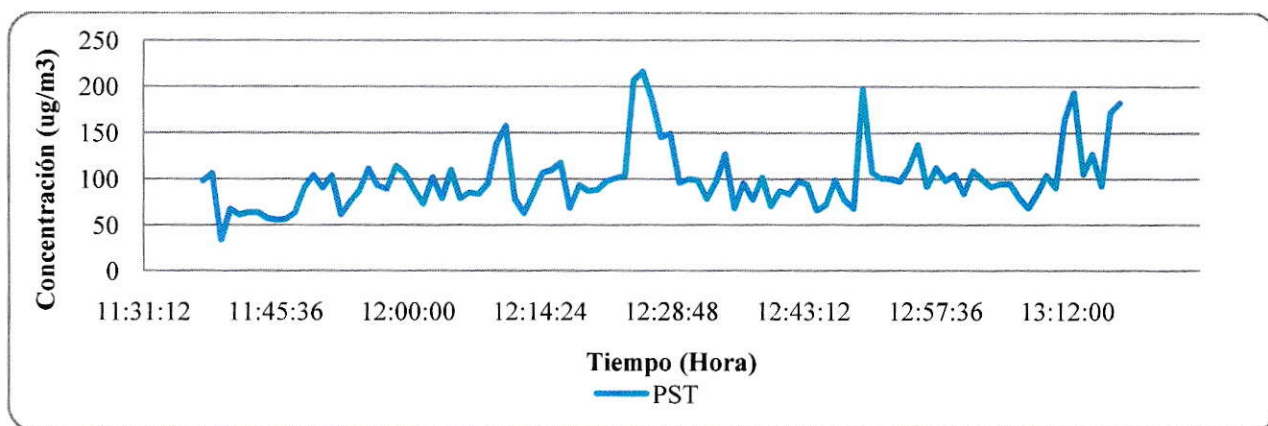


Figura 123. Medición de partículas suspendidas totales, PST, del día 24/1/2013 desde las 11:37 horas hasta las 13:17 horas en el S3.

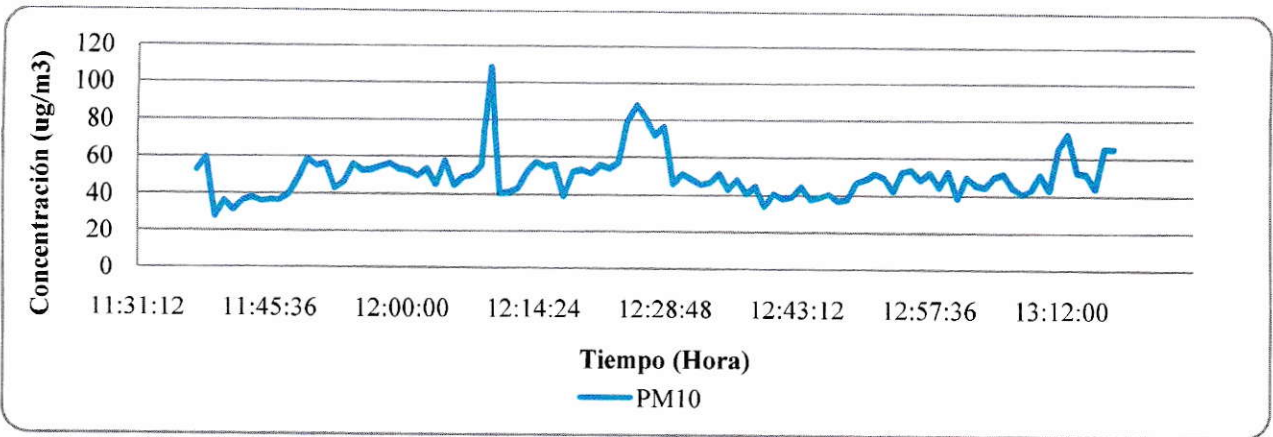


Figura 124. Medición de material particulado grueso, PM_{10} , del día 24/1/2013 desde las 11:37 horas hasta las 13:17 horas en el S3.

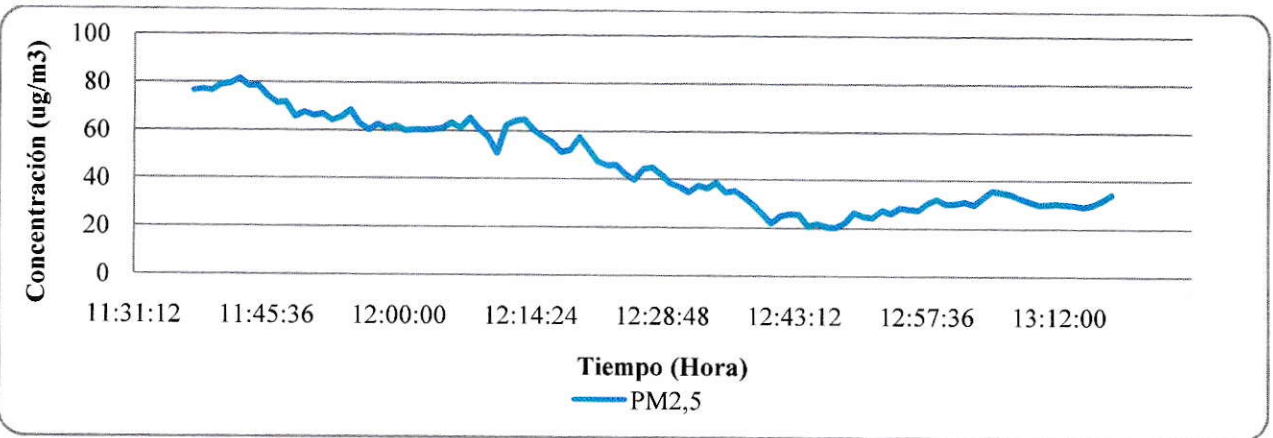


Figura 125. Medición de material particulado fino, $PM_{2,5}$, del día 24/1/2013 desde las 11:37 horas hasta las 13:17 horas en el S3.

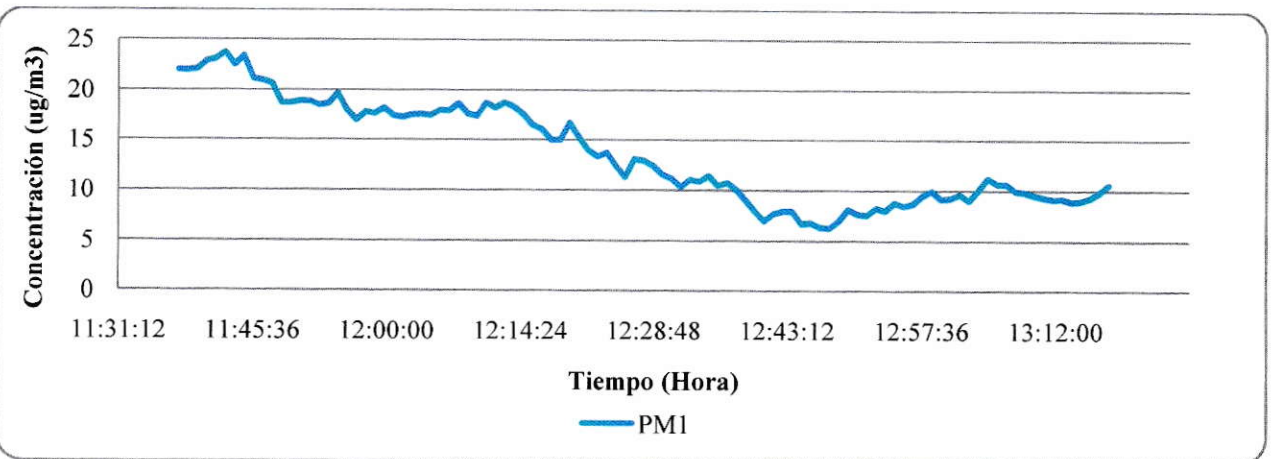


Figura 126. Medición de material particulado fino, PM_1 , del día 24/1/2013 desde las 11:37 horas hasta las 13:17 horas en el S3.

Tabla 41. Estadísticas de la medición del día 24/1/2013 desde las 11:37 horas hasta las 13:17 horas en el S3.

	PST	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁
Moda	67,600	44,800	-	7,920
Máxima	1389,400	1083,500	87,640	23,790
Mínima	33,800	27,800	20,260	6,260
Promedio	129,334	70,515	46,714	13,675

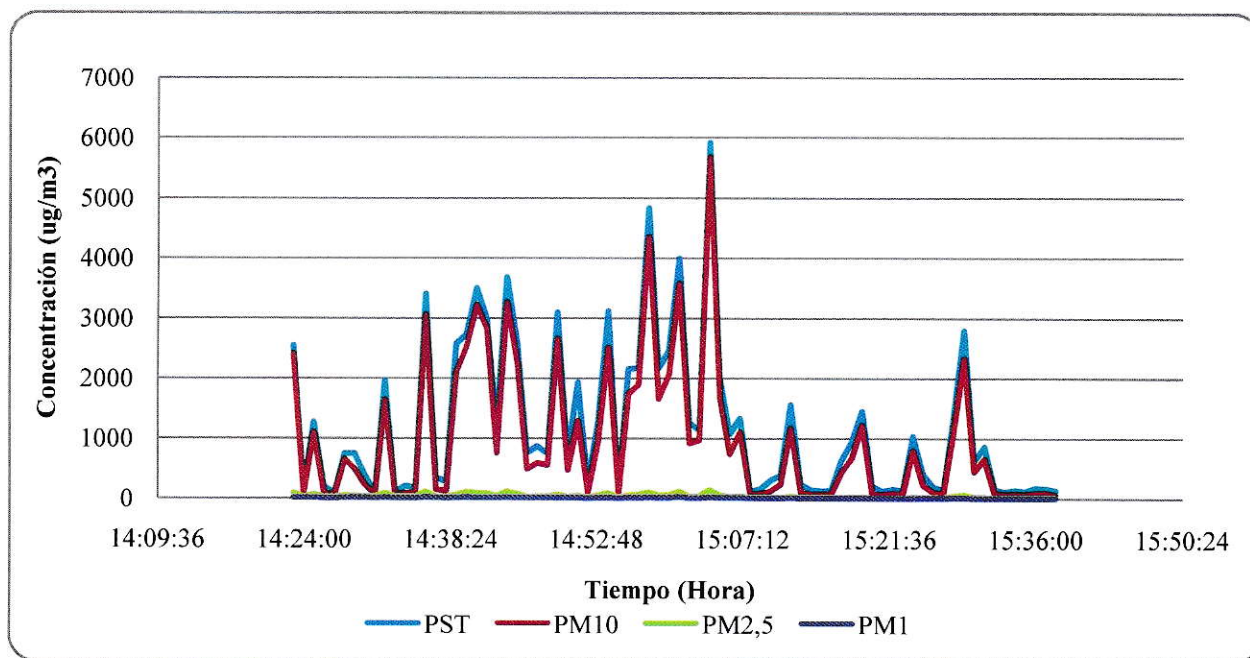


Figura 127. Medición de material particulado PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ del día 28/1/2013 desde las 14:22 horas hasta las 15:37 horas en el S3.

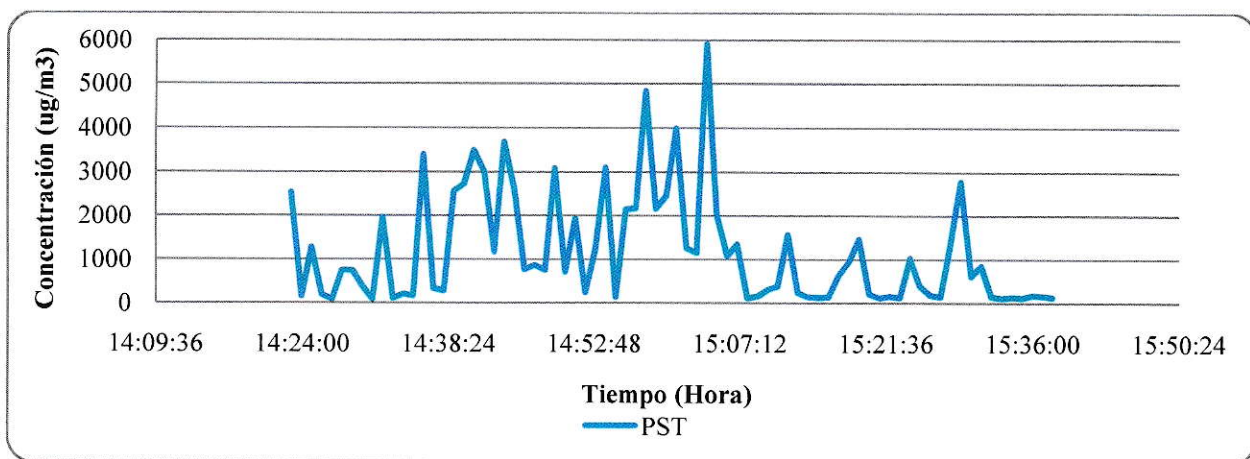


Figura 128. Medición de material particulado grueso, PM₁₀, del día 28/1/2013 desde las 14:22 horas hasta las 15:37 horas en el S3.

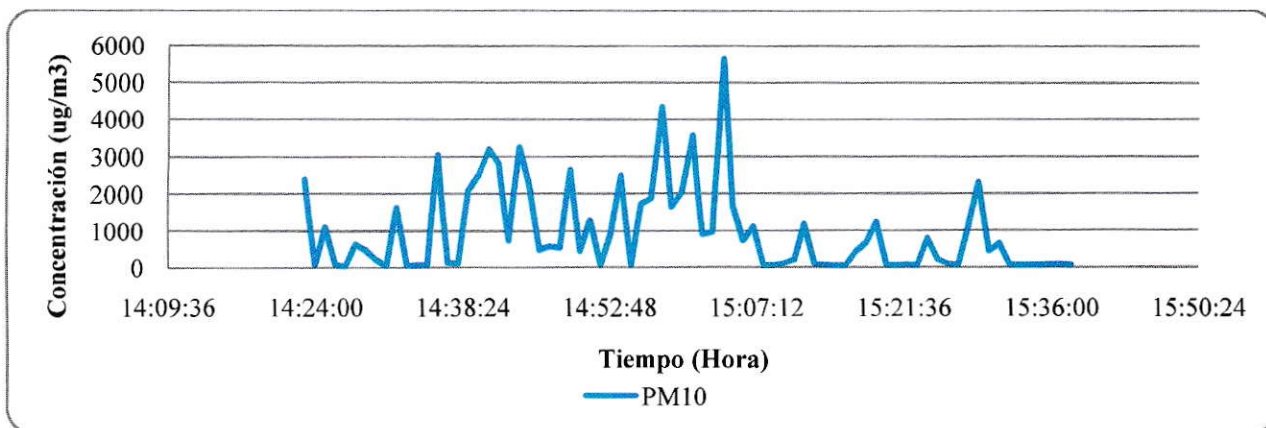


Figura 129. Medición de material particulado fino, PM₁₀, del día 28/1/2013 desde las 14:22 horas hasta las 15:37 horas en el S3.

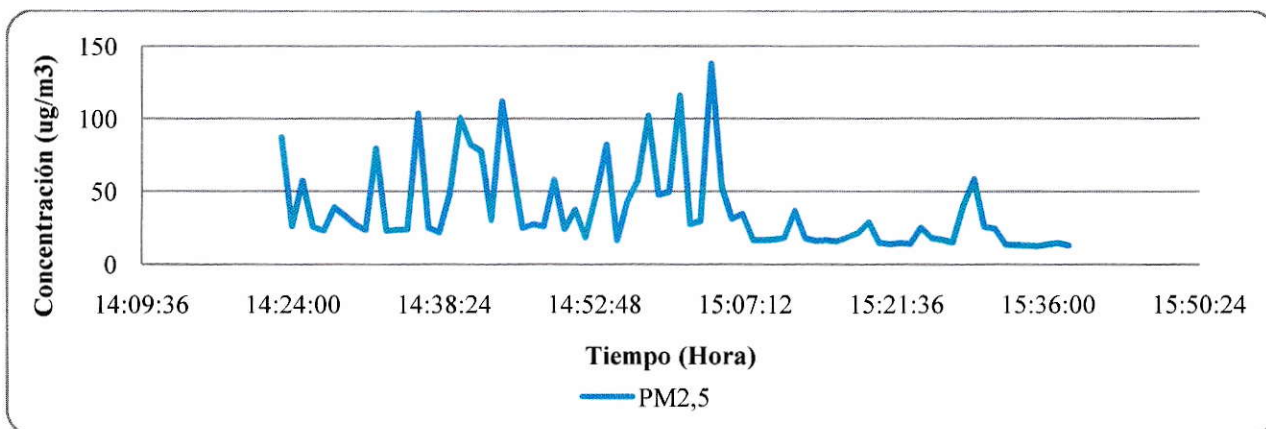


Figura 130. Medición de material particulado fino, PM_{2,5}, del día 28/1/2013 desde las 14:22 horas hasta las 15:37 horas en el S3.

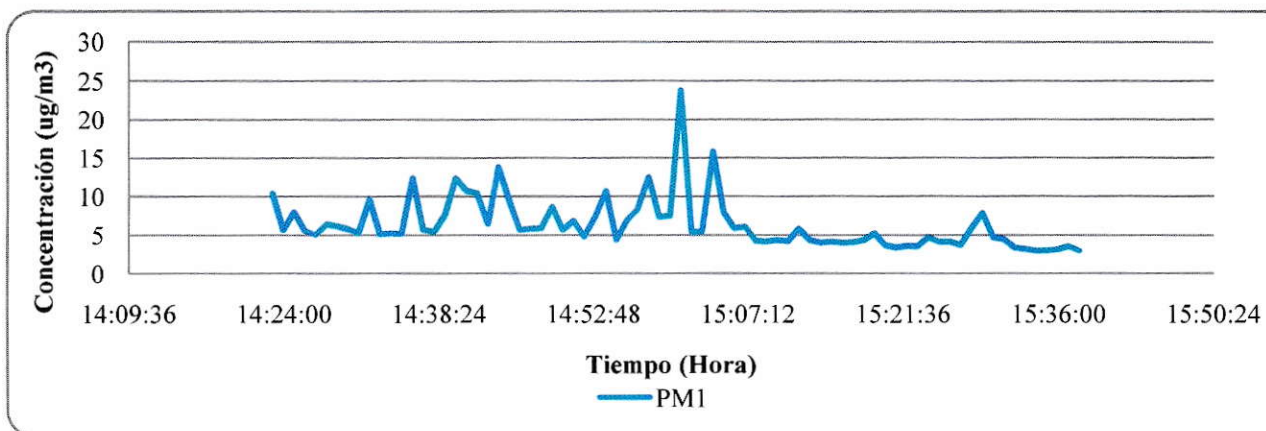


Figura 131. Medición de material particulado fino, PM₁, del día 28/1/2013 desde las 14:22 horas hasta las 15:37 horas en el S3.

Tabla 42. Estadísticas de la medición del día 28/1/2013 desde las 14:22 horas hasta las 15:37 horas en el S3.

	PST	PM10	PM2,5	PM1
Moda	-	66,4	-	5,240
Máxima	5909,700	5665,700	138,110	23,820
Mínima	81,300	43,400	12,650	2,980
Promedio	1190,503	970,497	37,838	6,406

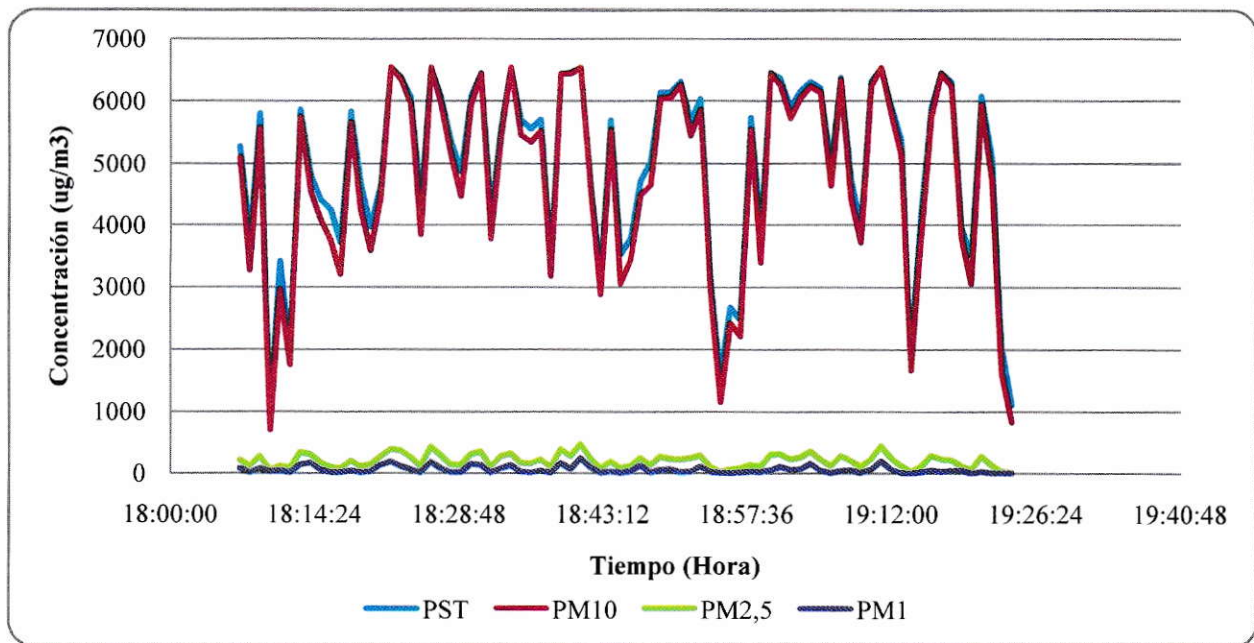


Figura 132. Medición de material particulado PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ del día 29/1/2013 desde las 18:06 horas hasta las 19:23 horas en el S3.

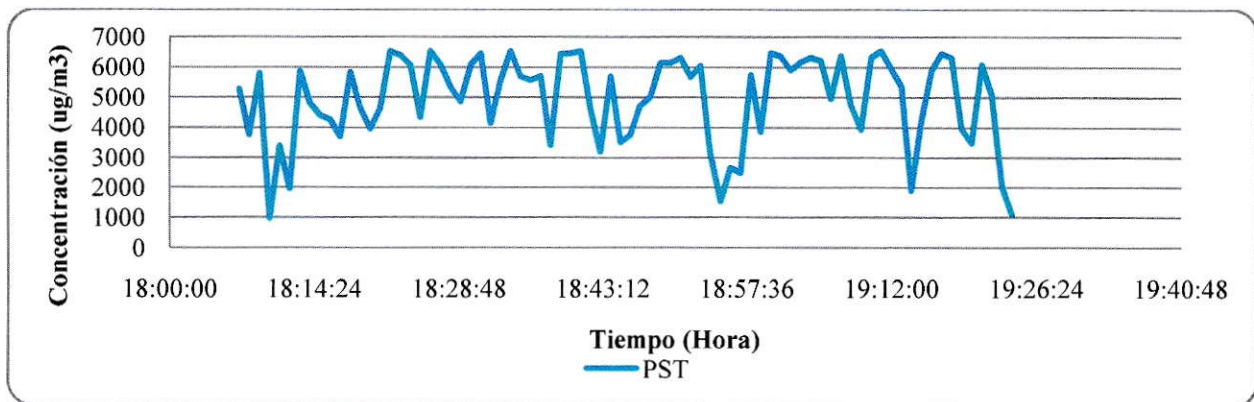


Figura 133. Medición de partículas suspendidas totales, PST, del día 29/1/2013 desde las 18:06 horas hasta las 19:23 horas en el S3.

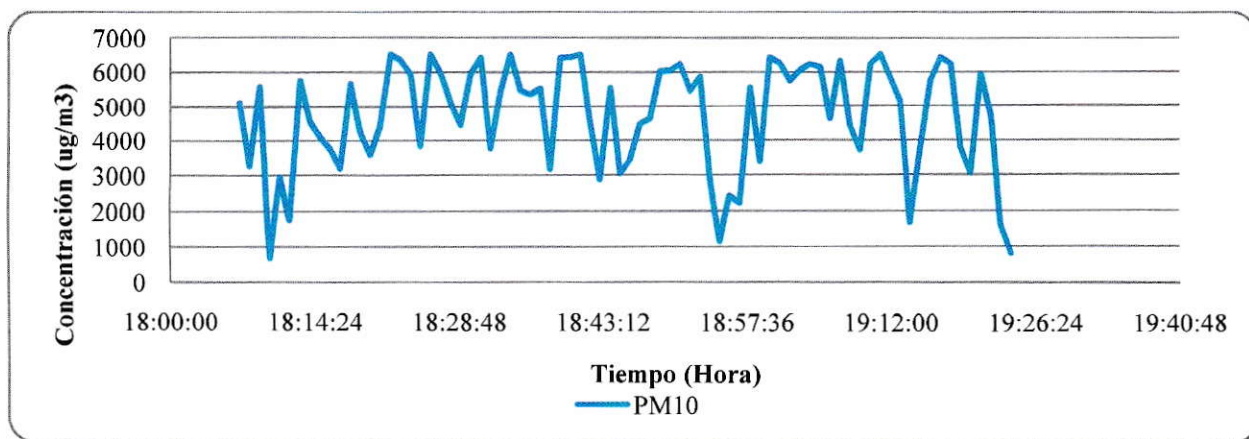


Figura 134. Medición de material particulado grueso, PM₁₀, del día 29/1/2013 desde las 18:06 horas hasta las 19:23 horas en el S3.

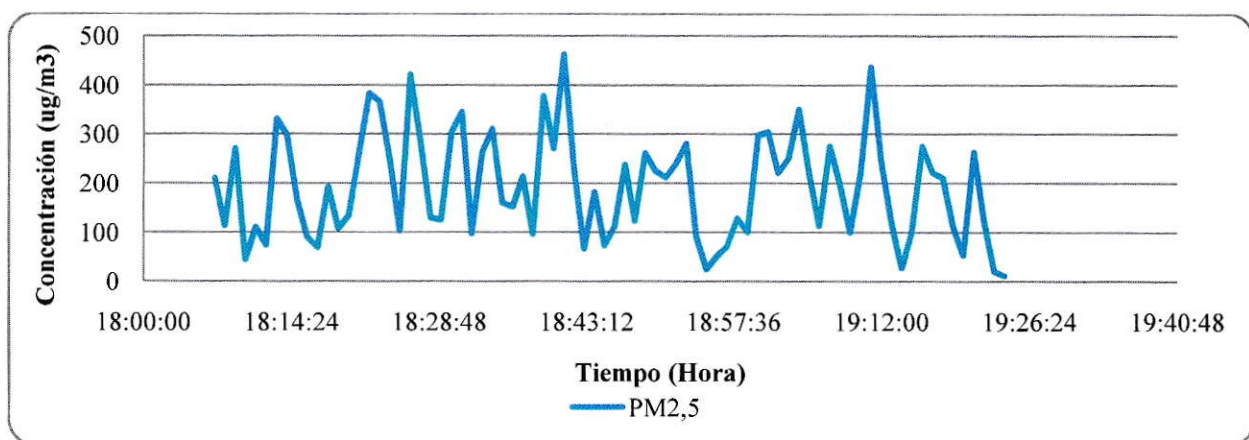


Figura 135. Medición de material particulado fino, PM_{2,5}, del día 29/1/2013 desde las 18:06 horas hasta las 19:23 horas en el S3.

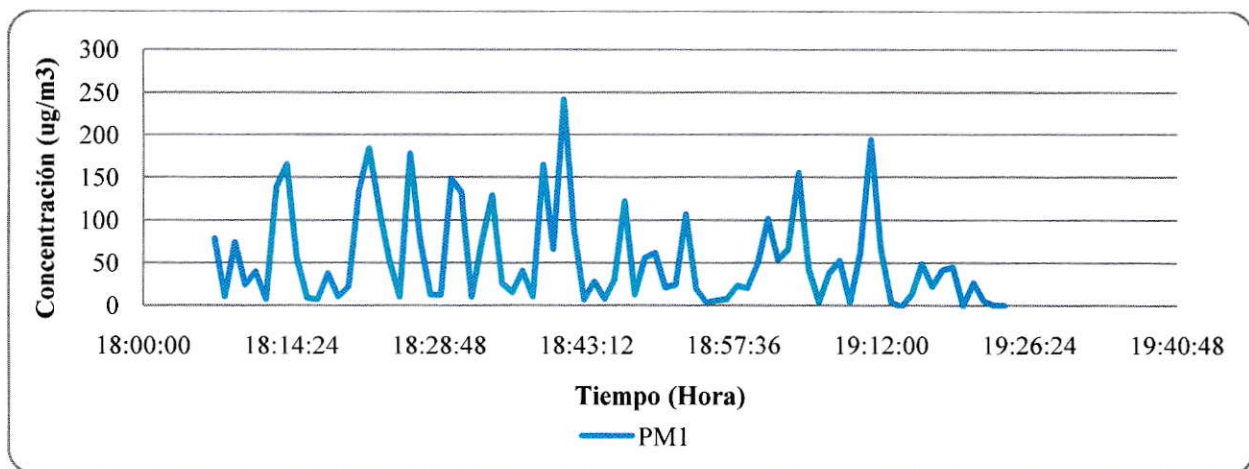


Figura 136. Medición de material particulado fino, PM₁, del día 29/1/2013 desde las 18:06 horas hasta las 19:23 horas en el S3.

Tabla 43. Estadísticas de la medición del día 29/1/2013 desde las 18:06 horas hasta las 19:23 horas en el S3.

	PST	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁
Moda	6527,900	6527,900	-	0
Máxima	6527,900	6527,900	462,920	242,140
Mínima	86,300	33,500	1,020	0
Promedio	4175,465	3972,464	160,383	44,820

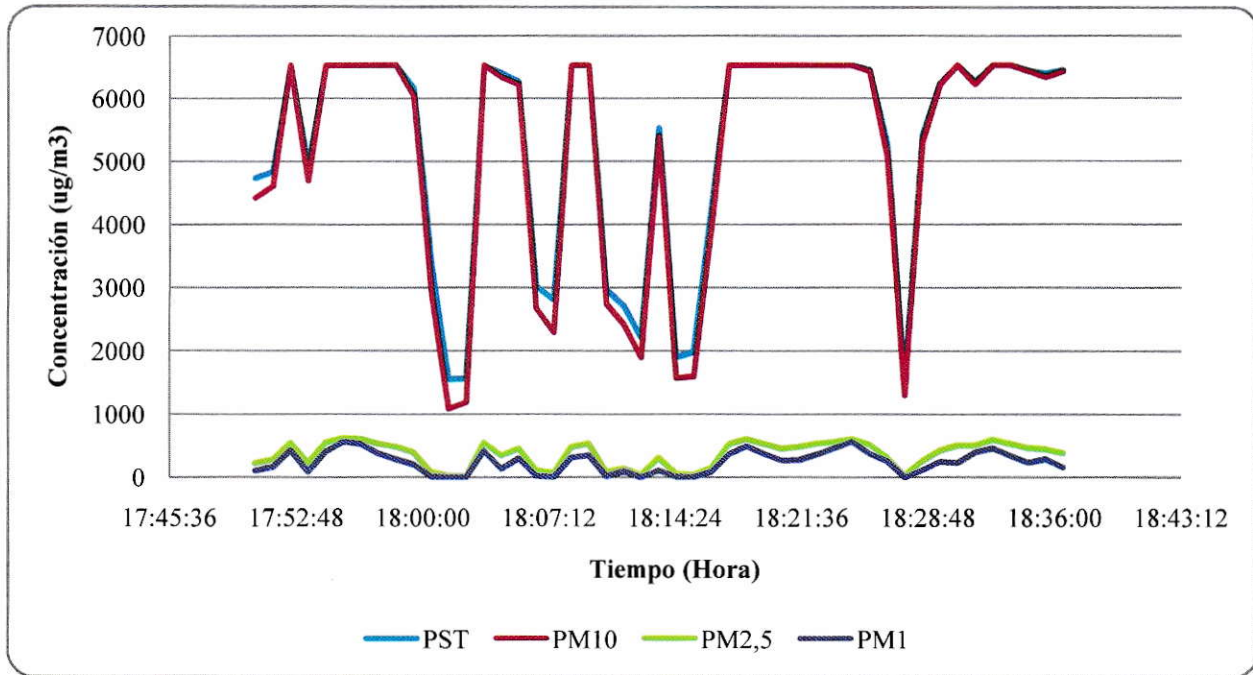


Figura 137. Medición de material particulado PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ del día 4/2/2013 desde las 17:50 horas hasta las 18:36 horas en el S3.

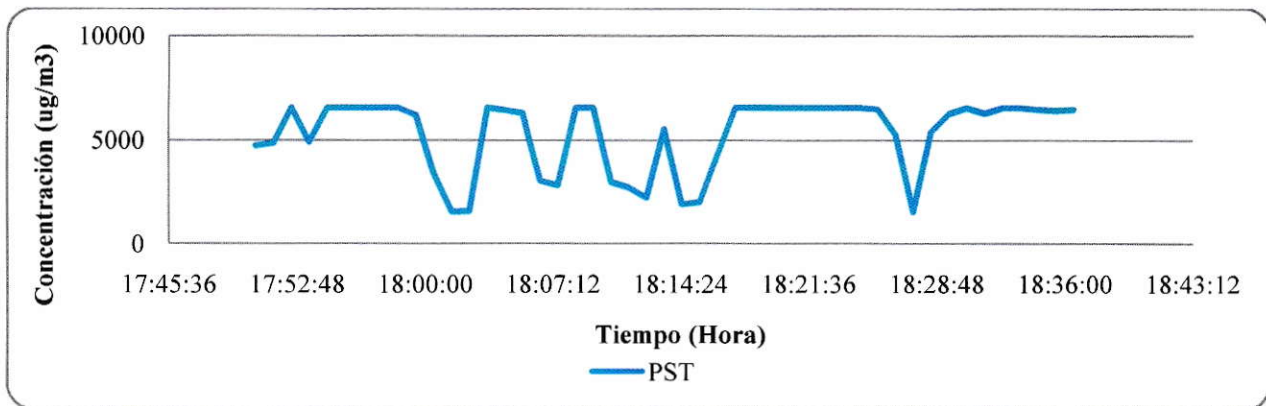


Figura 138. Medición de partículas suspendidas totales, PST, del día 4/2/2013 desde las 17:50 horas hasta las 18:36 horas en el S3.

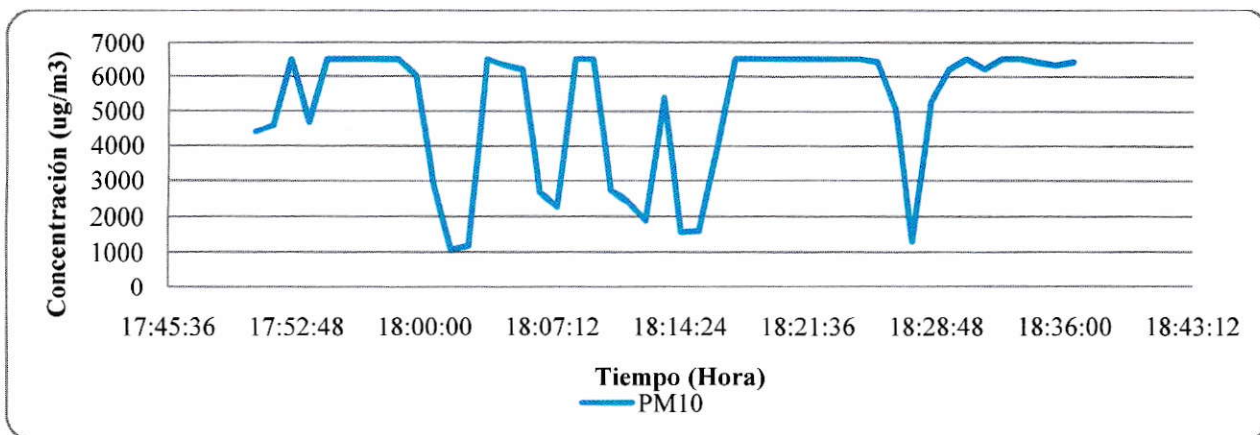


Figura 139. Medición de material particulado grueso, PM₁₀, del día 4/2/2013 desde las 17:50 horas hasta las 18:36 horas en el S3.

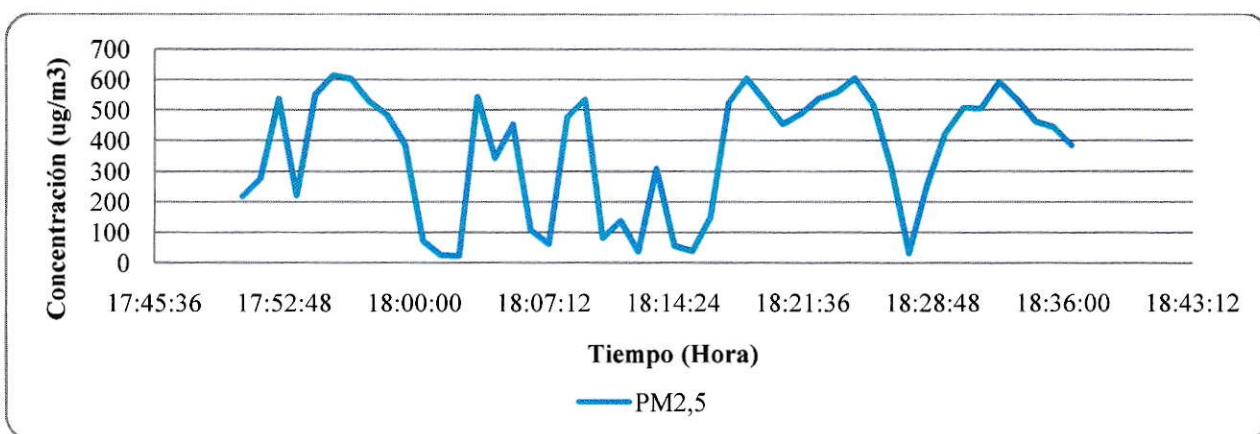


Figura 140. Medición de material particulado fino, PM_{2,5}, del día 4/2/2013 desde las 17:50 horas hasta las 18:36 horas en el S3.

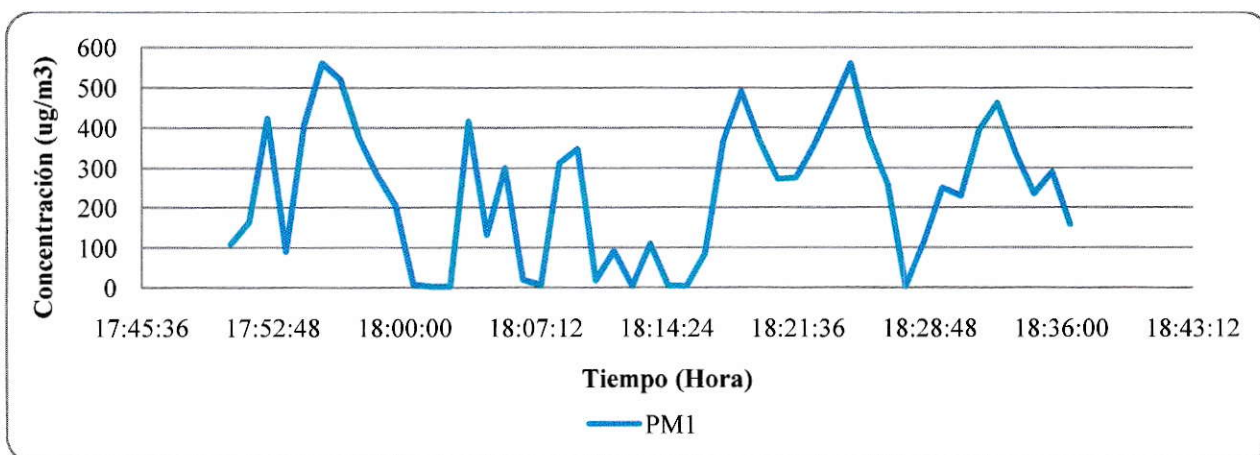


Figura 141. Medición de material particulado fino, PM₁, del día 4/2/2013 desde las 17:50 horas hasta las 18:36 horas en el S3.

Tabla 44. Estadísticas de la medición del día 4/2/2013 desde las 17:50 horas hasta las 18:36 horas en el S3.

	PST	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁
Moda	6527,900	6527,900	-	-
Máxima	6527,900	6527,900	615,960	560,710
Mínima	1521,300	1079,500	22,480	2,810
Promedio	5283,596	5155,366	364,681	239,628

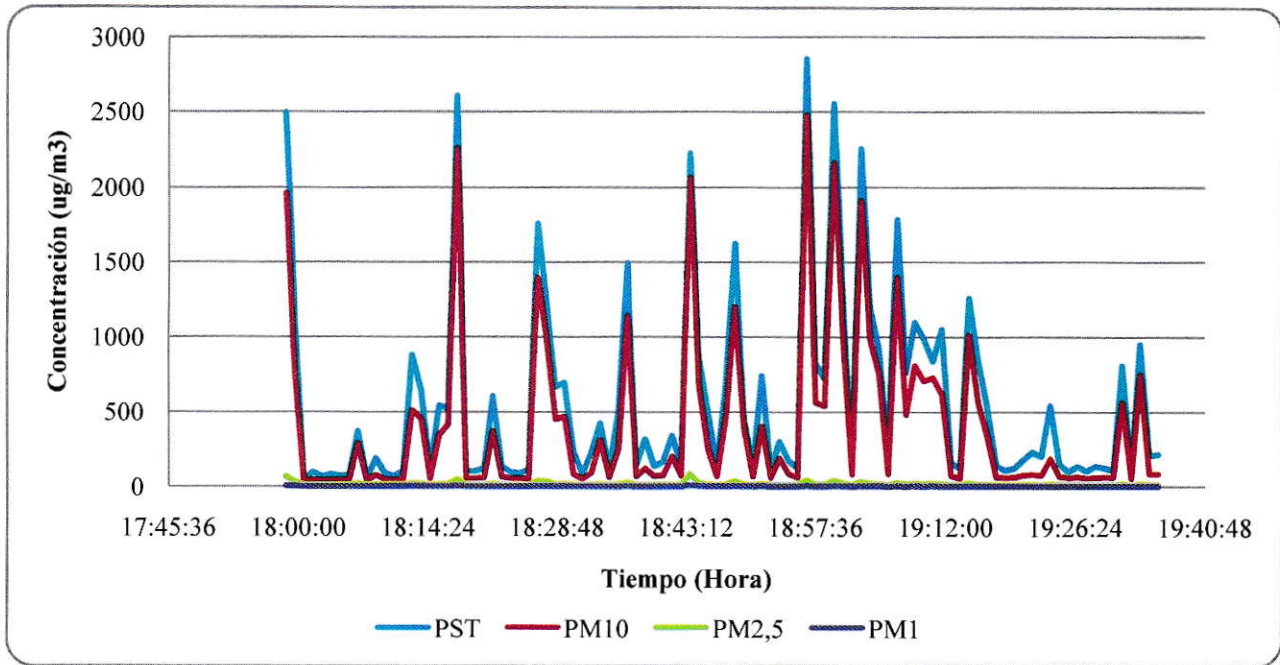


Figura 142. Medición de material particulado PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ del día 6/2/2013 desde las 17:58 horas hasta las 19:35 horas en el S3.

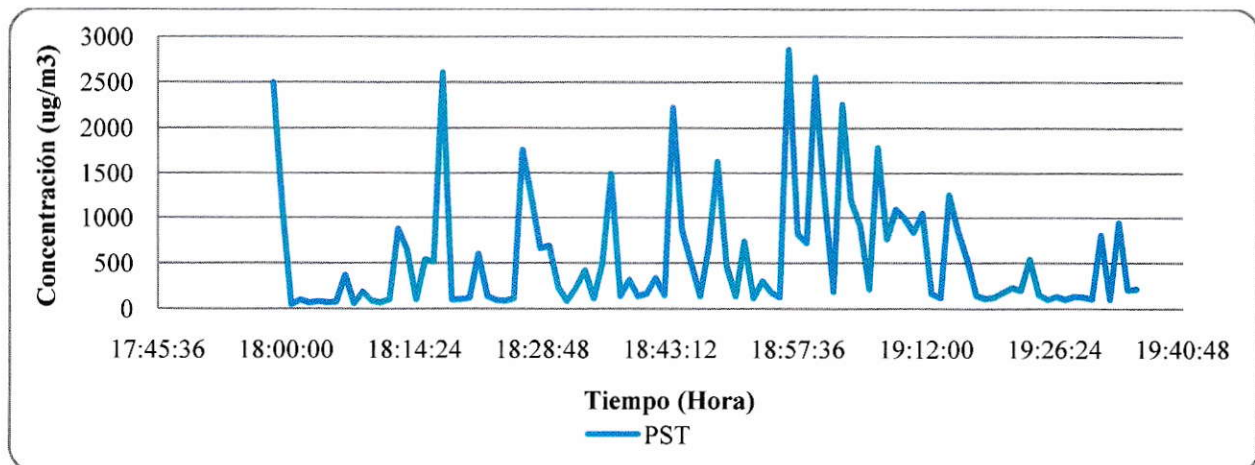


Figura 143. Medición de partículas suspendidas totales, PST, del día 6/2/2013 desde las 17:58 horas hasta las 19:35 horas en el S3.

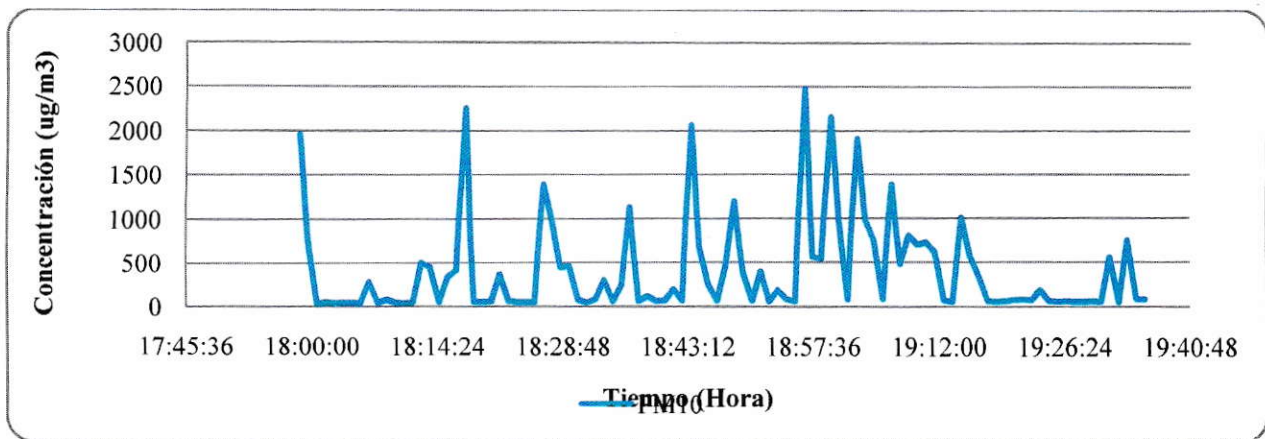


Figura 144. Medición de material particulado grueso, PM₁₀, del día 6/2/2013 desde las 17:58 horas hasta las 19:35 horas en el S3.

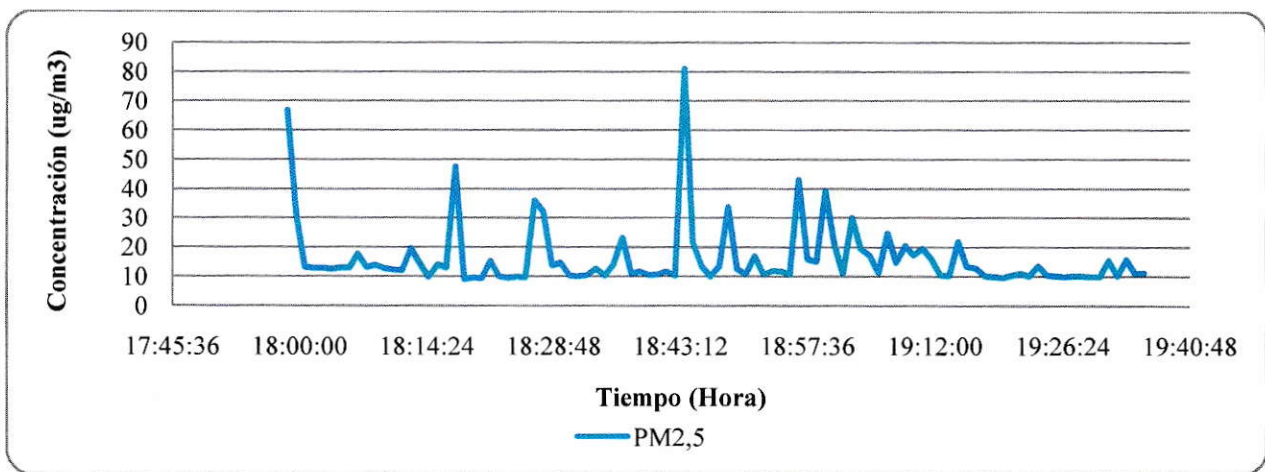


Figura 145. Medición de material particulado fino, PM_{2,5}, del día 6/2/2013 desde las 17:58 horas hasta las 19:35 horas en el S3.

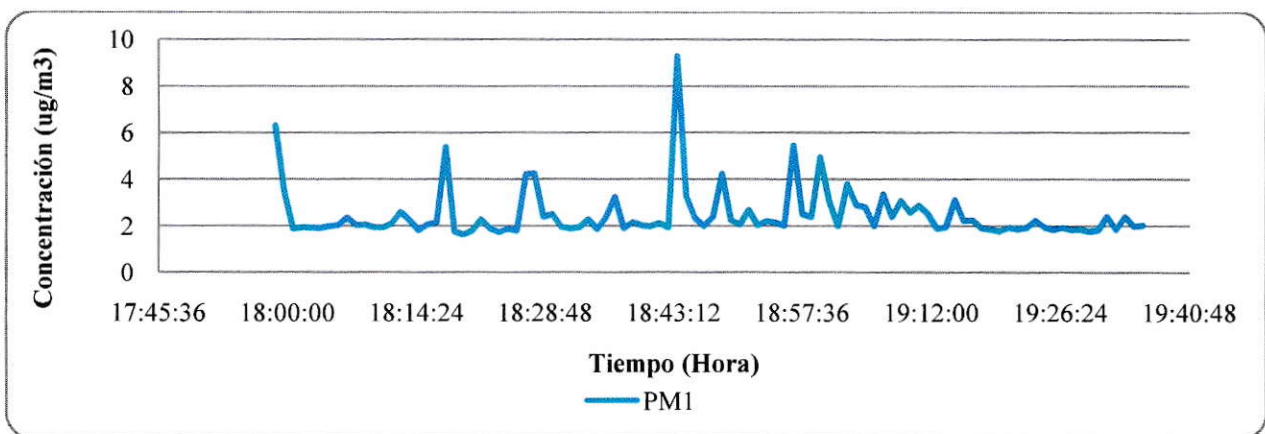


Figura 146. Medición de material particulado ultra fino, PM₁, del día 6/2/2013 desde las 17:58 horas hasta las 19:35 horas en el S3.

Tabla 45. Estadísticas de la medición del día 6/2/2013 desde las 17:58 horas hasta las 19:35 horas en el S3.

	PST	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁
Moda	-	62,000	10,130	1,940
Máxima	2854,900	2475,400	81,010	9,30
Mínima	48,200	32,000	9,140	1,640
Promedio	567,431	407,512	16,181	2,478

2.6. Mediciones de material particulado fuera del muro.

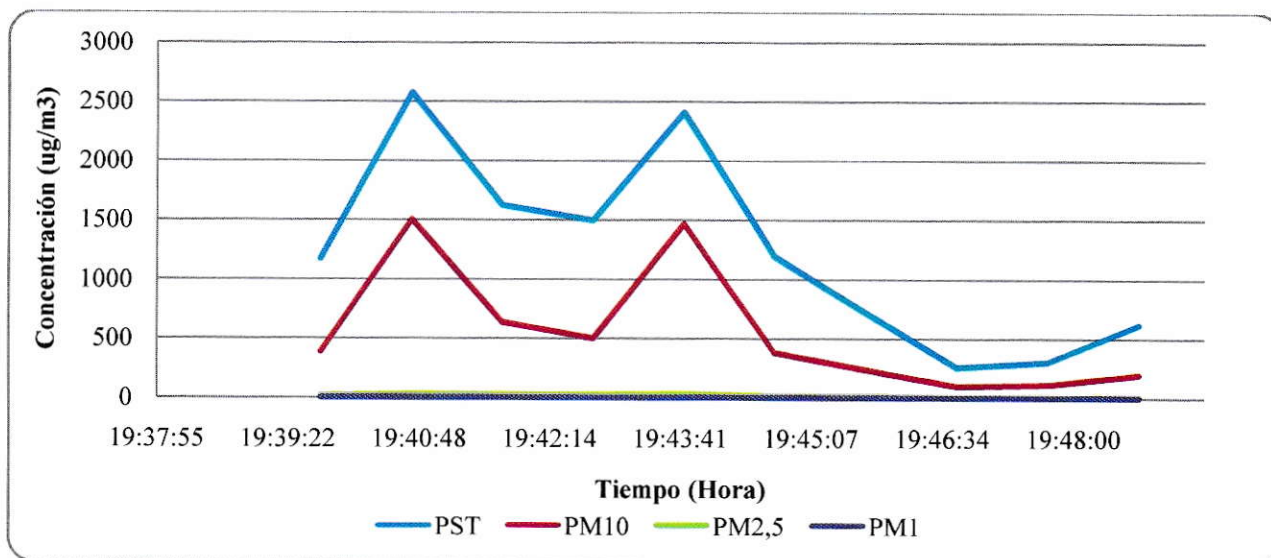


Figura 147. Medición de material particulado PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ del día 15/1/2013 desde las 19:39 horas hasta las 19:48 horas en el puente cercano a dren basal (300 metros aproximadamente del muro).

Tabla 46. Estadísticas de la medición del día 15/1/2013 desde las 19:39 horas hasta las 19:48 horas en el puente cercano a dren basal (300 metros aproximadamente del Muro).

	PST	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁
Moda	-	-	-	2,990
Máxima	2577,500	1496,300	25,750	2,990
Mínima	260,200	96,300	8,300	1,460
Promedio	1238,150	548,730	16,733	2,234

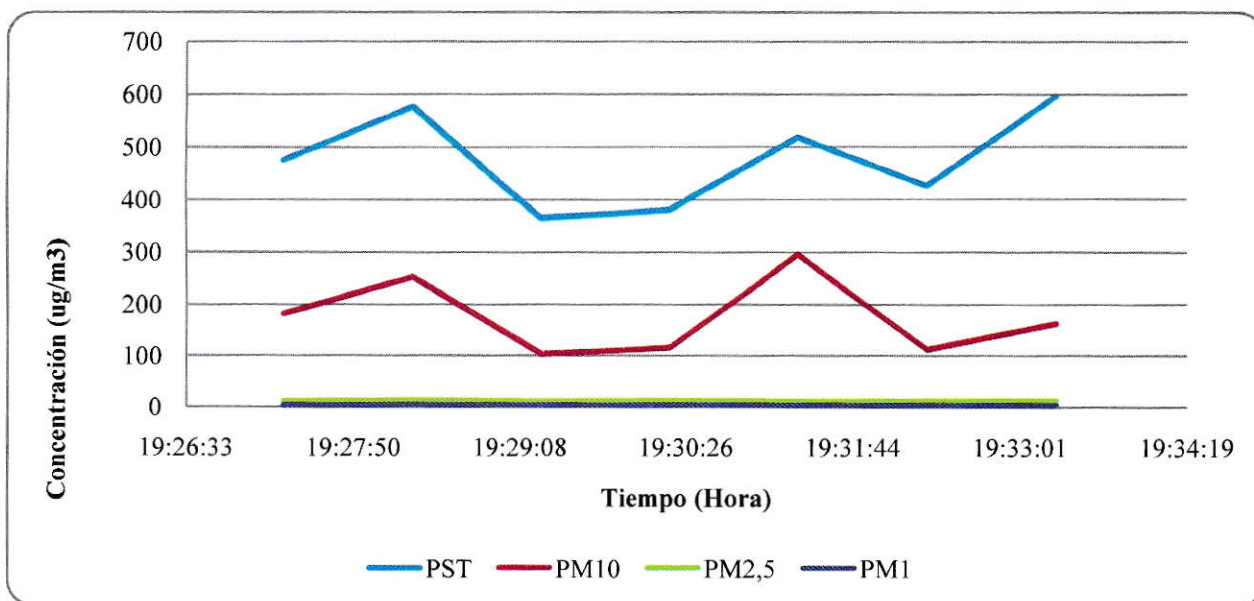


Figura 148. Medición de material particulado PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ del día 17/1/2013 desde las 19:27 horas hasta las 19:33 horas en cerro (torta aproximadamente a 600 metros del Muro).

Tabla 47. Estadísticas de la medición del día 17/1/2013 desde las 19:27 horas hasta las 19:33 horas en cerro (torta aproximadamente a 600 metros del Muro).

	PST	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁
Moda	-	-	-	0,750
Máxima	199,300	61,800	6,390	0,830
Mínima	86,800	39,200	4,650	0,750
Promedio	127,466	47,633	5,450	0,776

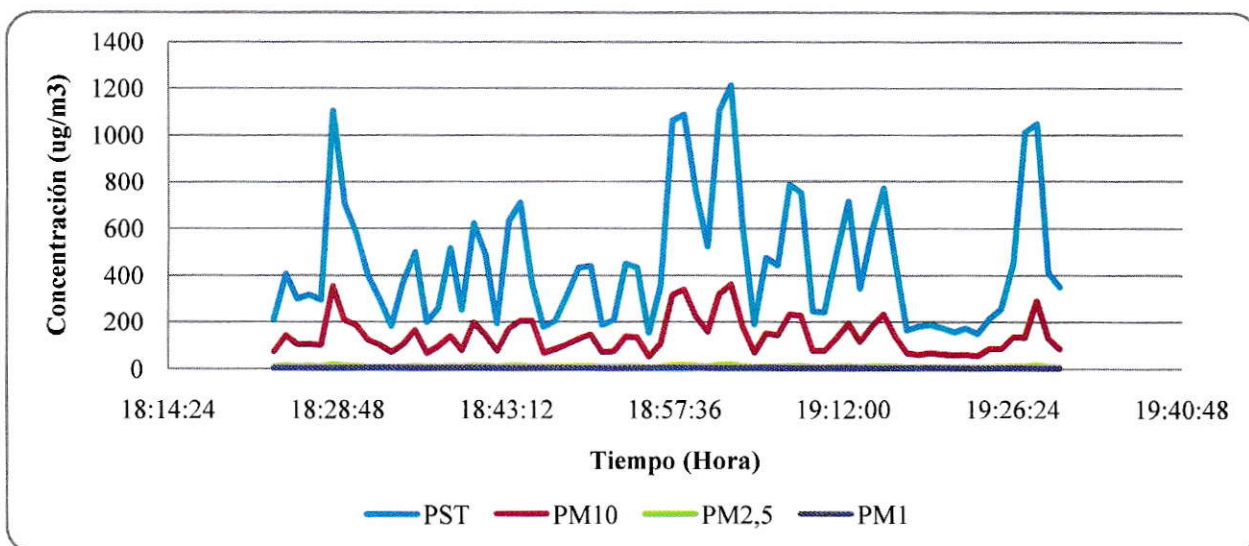


Figura 149. Medición de material particulado PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ del día 18/1/2013 desde las 18:22 horas hasta las 19:30 horas en cerro (torta aproximadamente a 600 metros del Muro).

Tabla 48. Estadísticas de la medición del día 18/1/2013 desde las 18:22 horas hasta las 19:30 horas en cerro (torta aproximadamente a 600 metros del Muro).

	PST	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁
Moda	-	-	-	-
Máxima	596,300	295,900	11,250	2,880
Mínima	365,300	102,500	9,870	2,580
Promedio	476,700	174,228	10,478	2,680

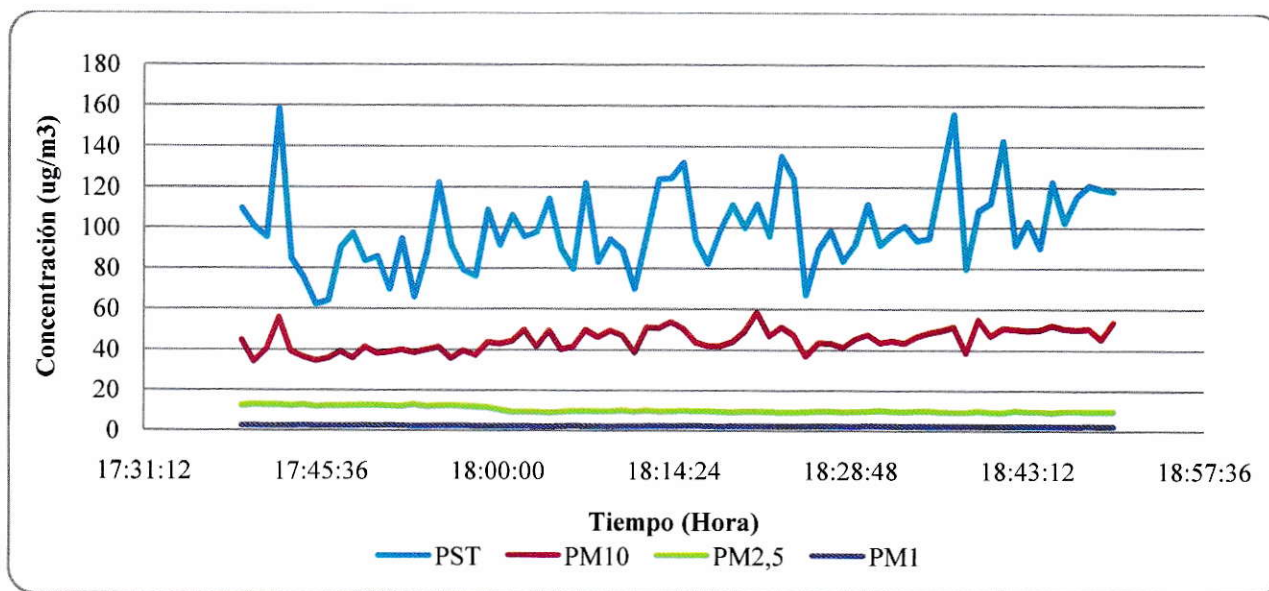


Figura 150. Medición de material particulado PST, PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ del día 7/2/2013 desde las 17:38 horas hasta las 18:40 horas en punto cercano a coronamiento S3 (cubeta).

Tabla 49. Estadísticas de la medición del día 7/2/2013 desde las 17:38 horas hasta las 18:40 horas en punto cercano a coronamiento S3 (cubeta).

	PST	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁
Moda	83,400	41,100	9,530	2,250
Máxima	199,900	58,200	12,810	2,620
Mínima	62,000	33,900	8,900	2,130
Promedio	101,265	44,831	10,356	2,351

ANEXO E

Tablas de referencia.

Tabla 50. Mineralogía de Planta Las Tórtolas en porcentaje.

	Alimentación Planta	Concentrado Rougher Norte	Concentrado Rougher Sur	Concentrado columnas	Relave final planta
Calcopirita	2,4	31,7	43	62,3	0,2
Calcosita	0,4	5,6	6,3	8,8	0,1
Covelina	0,1	1,1	1,7	2,6	0
Bornita	0,1	1,4	1,9	2,6	0
Enargita	0	0,2	0,2	0,3	0
Pirita	0,1	30,1	32	17,8	3,5
Molibdenita	0	0,1	0,2	0,3	0
Otros sulfuros	0,1	0,5	0,4	0,4	0,1
Cuarzo	33,1	7,4	3,3	1,1	33,6
Feldespatos	25,4	6	3	1,1	26,4
Micas	17,6	9,4	4,4	1,2	19,2
Clorita	5,2	1,8	1	0,3	5,1
Granate	2,8	0,8	0,4	0,2	2,8
Arcilla	2,9	1,2	0,5	0,2	2,8
Otros silicatos	0,5	0,5	0,3	0,2	0,6
Apatito	0,3	0,1	0,1	0	0,3
Rutilo/Anatasa	0,7	0,5	0,3	0,1	0,8
Hidróxido	4	1,4	0,8	0,4	4
Otros	0,5	0,2	0,2	0,1	0,4
Total	100	100	100	100	100

Tabla 51. Categorías de estabilidad atmosférica según Pasquill.

Categoría de estabilidad	Descripción	Exponente ambiente rural	Exponente ambiente urbano
A	Muy inestable	0,07	0,15
B	Moderadamente	0,07	0,15

	inestable		
C	Levemente inestable	0,10	0,20
D	Neutral	0,15	0,25
E	Levemente estable	0,35	0,30
F	Estable	0,55	0,30

Tabla 52. Escala de Beafort.

NºBeafort	Velocidad Viento (m/s)	Efectos en la tierra	Designación
0	0,0 - 0,2	Humo se levanta vertical	Calma
1	0,3 - 1,5	Humo se inclina	Flojo
2	1,6 - 3,3	Hojas se mueven	-
3	3,4 - 5,5	Hojas se agitan	Suave
4	5,5 - 7,9	Mueve ramas pequeñas	Moderado
5	8,0 - 10,7	Mueve árboles pequeños	Fresco
6	10,8 - 13,8	Mueve ramas grandes	Fuerte
7	13,9 - 17,1	Mueve árboles	-
8	17,2 - 20,7	Desgasta ramas	Galerna
9	20,8 - 24,4	Destroza chimeneas	-
10	24,5 - 28,4	Arranca árboles	Temporal
11	28,5 - 32,6	Grandes destrozos	-
12	>32,7	Huracán	Huracán

Tabla 53. Algunos valores de z_0 dependiendo de tipo de superficie.

Tipo de superficie	Valor de z_0 (cm)
Arena	0,01 - 0,1
Superficie nevada	0,1 - 0,6
Hierba segada	0,6 - 1
Hierba corta	1 - 4
Hierba larga	4 - 10