

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**“DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PM₁₀ EN LA
CIUDAD DE PISCO”**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE HIGIENE Y SEGURIDAD INDUSTRIAL

PRESENTADO POR:

LEONARDO DAVID CALDERÓN ZAVALA

DAVID MARTÍN QUINTANILLA COZ

LIMA, PERÚ

2008

DEDICATORIA

A mi Padre y padres David y Virginia.

David Quintanilla

A mis hermanos del sur que sufren aún por el terremoto del 15 de agosto del 2007.

Leonardo Calderón

AGRADECIMIENTOS

Nuestra gratitud en primer lugar a nuestros padres: David y Virginia, David, Carmen y Lidubina. Asimismo hacemos alcance a nuestro asesor, Ing. Juan Narciso, el reconocimiento de su imprescindible guía en la elaboración de este documento. Además, extendemos el saludo al CONAM y DIGESA por los equipos y laboratorio. A los Ingenieros David Escobar y Rosell Choque; también a la Licenciada Beatriz Castañeda por su dirección y colaboración.

En forma muy especial queremos hacer mención a nuestro amigo Ing. Jesús Trelles por su continua participación y asesoramiento durante este proceso.

A los pobladores de Pisco que brindaron sus casas, establecimientos comerciales, así como los responsables de entidades del Estado; por permitir colocar allí los equipos de muestreo.

A nuestro buen Dios por mantenernos con salud a lo largo de esta expedición.

RESUMEN

Siendo de suma importancia para la salud del ser humano el conocer el grado de contaminación atmosférica para evitar afecciones en el sistema cardiorespiratorio; se realizó la colección de material particulado con diámetro aerodinámico inferior a $10\ \mu\text{m}$ (PM_{10}) en filtros de microfibra de cuarzo ($37\ \text{mm}$ de diámetro y $5\ \mu\text{m}$ de tamaño de poro) a través de 106 muestras situadas en 17 estaciones, (9 en el distrito de Pisco y 2 en cada uno de los distritos restantes) cubriendo un área total de $150.26\ \text{km}^2$ desde febrero del 2005 hasta enero del 2006. La investigación determinó si en la ciudad de Pisco y sus alrededores se superaba lo estipulado en el Decreto Supremo N° 074-2001-PCM en su Artículo 4 donde se establecen los estándares primarios de calidad del aire y los niveles de concentración máxima. En estos Estándares de Calidad Ambiental (ECA) se sostiene que el valor límite es de $50\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ cada 24 horas en el periodo de un año como media aritmética y tener 3 días como máximo con valores de $150\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el lapso antes descrito. El promedio aritmético fue de $77.21\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ y durante el muestreo se superó 5 veces los valores de $150\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, habiendo superado en ambos casos dichas cifras limitantes. Se realizaron pruebas no paramétricas para comprobar la veracidad de los resultados siendo estos de tendencia no normal. Asimismo, se compararon los resultados de la parte rural con la urbana para determinar el origen de la contaminación y su comportamiento en el radio de acción. Además, se realizó un mapa de distribución espacial de las concentraciones dentro de la cuenca atmosférica señalando las áreas urbanizadas, agrícolas, desérticas e industriales; así como los focos de emisiones para evaluar las posibles tendencias de contaminación del área de estudio. Por otro lado, se examinó el comportamiento que tiene la concentración en los distintos puntos de muestreo con respecto a los fenómenos meteorológicos. Con respecto a la humedad varió inversamente proporcional en las zonas urbanas, mientras que en las zonas consideradas rurales varió en forma directa. La relación fue opuesta en lo que respecta a velocidad de vientos, siendo los "vientos Paracas" los que mostraron los puntos más extremos de concentración de PM_{10} durante aquellos eventos. Con respecto a la temperatura las variaciones estuvieron ligadas a la estación del año y a la humedad. Por último, del total de 122 968 pobladores, 120 847 estuvieron expuestos a niveles superiores de este contaminante.

ABSTRACT

It is extremely important for humans' health to know atmospheric contamination levels in order to avoid deficiencies that may occur to cardiorespiratory system; for that matter, particulate matter with aerodynamic diameter less than 10 μm (PM_{10}) was collected in quartz microfiber filters (37 mm diameter and 5 μm pore size) through 106 samples divided in 17 stations (9 in Pisco district and 2 in each of the remaining districts) covering a total area of 150.26 Km^2 since February 2005 until January 2006. The research determined whether the city of Pisco and its surroundings were exceeding what is stated in the Presidential Decree N° 074-2001-PCM Article 4, which establishes the primary air quality standards and threshold limit values. These Environmental Quality Standards (EQS) register that TLV is 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in 24 hours during a year as an arithmetic mean and have 3 days with values exceeding 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in the same period. The arithmetic mean was 77.21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, during the sampling the limit of 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ was exceeded 5 times. Non parametric tests were done to corroborate the precision of the results due to their non normal tendencies. Also, the results from rural areas were compared with those from urban sites in order to determine the origin of contamination and its behavior in the zone. Furthermore, a distribution map was made pointing the concentrations inside the area of study indicating urban, agricultural, desert, and industrial territories; also it showed the emissions centre so the contamination tendencies may be analyzed. Additionally, the behavior of concentrations was compared with meteorological phenomena. Humidity changed inversely in urban areas; meanwhile in rural zones the changed was directly proportional to concentration. The relation was opposite in connection with wind speed, thus "Paracas winds" showed mayor PM_{10} concentrations during those events. Temperature variations were established due to seasons and humidity. Lastly, out of 122 698 habitants, 120 847 were exposed to superior levels of this contaminant.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
PORTADA	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
INTRODUCCION	1
1. ANTECEDENTES	2
1.1. Información General	2
1.2. Área de Estudio	3
1.3. Geografía y Clima	4
1.3.1. Delimitaciones de la Cuenca Atmosférica	4
1.3.1.1. Geomorfología	5
1.3.1.2. Hidrología	5
1.3.1.3. Régimen Térmico	5
1.3.1.4. Régimen Hídrico	7
1.3.1.5. Vientos	7
1.3.1.6. Humedad Relativa	8
1.4. Entidades Involucradas en Actividades de Monitoreo Ambiental en la Zona	9
1.4.1. Dirección General de Capitanías y Guardacostas (DICAPI)	10
1.4.2. Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA)	10
1.4.3. Instituto del Mar del Perú (IMARPE)	11
1.4.4. Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA)	12
1.4.5. Dirección Nacional de Medio Ambiente – DINAMA – Viceministerio de Pesquería	13
1.4.6. Ministerio de Energía y Minas	13
1.4.7. Organismo Supervisor de la Inversión en Energía (OSINERG)	14
1.4.8. APROPISCO S. A. C.	15
1.4.9. Grupos de Estudio Técnico Ambiental (GESTA) Zonal de Pisco	15

1.4.10.	ACEROS AREQUIPA S. A.	16
1.4.11.	FUNSUR S. A.	16
1.5.	ESTUDIOS INTERNACIONALES	18
1.5.1.	PM _{2.5} Induce Alteraciones Cardiacas en Ratas Sanas	18
1.5.2.	Las características de los perfiles verticales y fuentes de PM _{2.5} y P M ₁₀ y especies carbonosas en Beijing	19
1.5.3.	Variaciones Temporales y Distribución Espacial de PM _{2.5} Ambiental y Concentraciones PM ₁₀ en Dhaka, Bangladesh	20
1.5.4.	Caracterización Química de Partículas Individuales (PM ₁₀) de Aire Ambiental en Ciudad Guiyang, China	21
1.5.5.	Una Red Neuronal de Pronóstico Diario para Concentraciones de PM ₁₀ en Bélgica	21
1.5.6	Los Efectos de Polvo Asiático en Acontecimientos Diarios sobre Admisiones de Golpe en Taipei, Taiwán	22
1.5.7.	PM ₁₀ Pronosticando para Thessaloniki, Grecia	23
1.5.8.	Niveles y Mutagenicidad de Partículas Aerotransportadas PM ₁₀ y PM _{2.5} en Chiang Mai, Tailandia	23
1.5.9.	Evaluación de Funcionamiento del MiniVOL Portátil para Evaluación de PM ₁₀	24
1.5.10.	Determinación de la Fuente PM ₁₀ y PM _{2.5} en el Area Metropolitana de Barcelona, Cataluña, España	25
1.5.11.	Los Niveles de Material Particulado en Sitios Rurales, Urbanos e Industriales en España	26
1.5.12.	Mediciones de PM ₁₀ en Estación McMurdo, Antártica	27
1.5.13.	PM ₁₀ y el Humo Negro Estudiado en un Pequeño Pueblo de República Checa	27
1.5.14.	Caracterización Química de Episodios de PM al NE de España	28
1.6.	Estudios en Sudamérica	29
1.6.1.	Composición Elemental de PM ₁₀ y PM _{2.5} en Ambiente Urbano en el Sur de Brasil	29
1.6.2.	Los Efectos de Contaminación Atmosférica y Parámetros Meteorológicos sobre Morbilidad Respiratoria Durante el Verano en la Ciudad de São Paulo	30
1.6.3.	Promedios Geométricos de Material Particulado Fracción	31

	Respirable (PM ₁₀) y Detección de Metales en el Aire de Bucaramanga – Colombia	
1.6.4.	Prediction of Maximum of 24-H Average of PM ₁₀ Concentrations 30 H in Advance in Santiago-Chile	32
1.6.5.	Los Efectos en Salud de la Contaminación Atmosférica por PM ₁₀ en Santiago	33
1.6.6.	Calidad del Aire en Santiago, Chile: un Modelo de Acercamiento II. PM _{2.5} , PM ₁₀ y Material Particulado	36
1.6.7.	Enfermedades Asociadas a la Polución Atmosférica por Combustibles Fósiles. Aspectos Pediátricos	37
1.6.8.	Cómo Estimar los Efectos de la Contaminación Atmosférica en la Salud	39
1.7.	Estudios en Perú	40
1.7.1	Estudio Epidemiológico por Exposición a Contaminantes Atmosféricos de la Población en Riesgo de Arequipa 2004	40
1.7.2.	Informe de Grupo Técnico II Monitoreo Ambiental (Comisión de Desarrollo Sostenible de Paracas)	42
1.7.3.	Estudio de la Calidad del Aire de la Ciudad de Lima Metropolitana 1996 – 2000	43
1.7.4.	Blowing Sand and Surface Winds in the Pisco to Chala Area, Southern Peru	45
1.7.5.	Evaluación de la Calidad del Aire de la Ciudad de Pisco	46
2.	JUSTIFICACIÓN	48
2.1.	Fuentes Móviles	48
2.1.1.	Inventario de Fuentes Móviles	48
2.2.	Fuentes Fijas	54
2.2.1.	Población y Desarrollo Urbano	56
2.2.2.	Inventario de las Fuentes Fijas	58
2.3.	Calidad del Aire	61
2.3.1.	Partículas Totales en suspensión y Partículas PM _{2.5}	63
2.4.	Impacto de la Contaminación del Aire en la Sociedad	64
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA CIENTÍFICO	72

4.	MARCO TEÓRICO Y LEGAL	73
4.1.	Marco Teórico	73
4.1.1.	Contaminación Ambiental	73
4.1.2.	La Contaminación Atmosférica	74
4.1.2.1.	La Atmósfera	74
	a. Estructura y Composición.	74
	b. Aspectos Meteorológicos	77
	• El Movimiento de la Atmósfera	78
	• La Inversión Térmica	79
	• La Radiación Solar	81
	• La Circulación del Viento	82
	• La Tasa de Cambio	87
	• Las Condiciones de Estabilidad	90
	• El Perfil de Velocidad del Viento	99
	• La Altura Máxima de Mezclado	103
	• La Rosa de los Vientos	105
	• La Turbulencia	108
	• Las Características Generales de las Plumas de las Chimeneas	109
	• El Efecto de la Isla Calórica	114
	• La Circulación Global de los Contaminantes	115
4.1.2.2.	La Contaminación del Aire	120
4.1.3.	Contaminantes Atmosféricos	121
4.1.3.1.	Los Compuestos Gaseosos del Carbono	121
	a. Los Hidrocarburos	121
	b. Los Hidrocarburos Oxigenados	122
	c. El Monóxido de Carbono	123
	d. El Dióxido de Carbono	
4.1.3.2.	Los Compuestos Gaseosos del Azufre	124
	a. Los Oxidos de Azufre	125
	b. El Sulfuro de Hidrógeno	127
4.1.3.3.	Los Compuestos Gaseosos del Nitrógeno	128

a.	Los Oxidos de Nitrógeno	128
b.	El Amoniaco	129
c.	Los PAN, PPN y PBN	129
4.1.3.4.	Los Gases Halogenados	130
4.1.3.5.	El Ozono	130
4.1.3.6.	Metales y Derivados	133
a.	El Plomo	134
b.	El Mercurio	134
c.	El Cadmio	135
d.	El Níquel	135
e.	El Berilio	135
f.	El Vanadio	135
g.	El Cromo	135
h.	El Zinc	135
4.1.3.7.	Los Aerosoles y Partículas	136
a.	Aerosoles Primarios	136
b.	Aerosoles Secundarios	137
4.1.3.8.	Otros Contaminantes	138
a.	Los Derivados del Cloro	138
b.	El Bromo	138
c.	El Yodo	139
d.	El Arsénico	139
e.	El Benceno	139
f.	El 1.3 Butadieno	140
g.	Las Fases de Energía Nuclear	140
4.1.4.	Fuentes de Contaminación Atmosférica	142
4.1.4.1.	Emisiones Industriales	142
4.1.4.2.	Emisiones por Vehículos Motorizados	142
4.1.4.3.	Contaminación en Hogares	142
4.1.5.	Sinergias entre Contaminantes	142
4.1.6.	Efectos de la Contaminación Atmosférica	144
4.1.6.1.	La Lluvia Ácida	144
4.1.6.2.	El Efecto Invernadero	148
4.1.7.	Partículas Totales en Suspensión	149

4.1.7.1.	Principales Fuentes, Origenes y Causas del Material Particulado	152
4.1.7.2.	Clasificación	152
a.	Por el Mecanismo de Formación	153
•	Partículas Primarias	153
•	Partículas Secundarias	153
b.	Por las Fuentes de Emisiones	153
•	Fuentes de Punto	153
•	Fuentes de Área	153
•	Fuentes Móviles	153
4.1.7.3.	Presencia en el Ambiente	153
a.	Naturales	153
b.	Antropogénicas	154
4.1.7.4.	Efectos en el Ambiente	155
4.1.7.5.	Efectos en la Salud	156
4.1.7.6.	Material Particulado Respirable con Diámetro Aerodinámico de 10 μm (PM_{10}).	157
4.1.7.7.	Material Particulado Respirable con Diámetro Aerodinámico de 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$).	157
4.1.8.	Material Particulado con Diámetro Aerodinámico Inferior a 10 μm (PM_{10})	158
4.1.8.1.	Efectos en la Salud	160
4.1.8.2.	Factores Meteorológicos Condicionantes	168
a.	Factores Meteorológicos a Microescala	169
b.	Factores Meteorológicos a Media y Gran Escala	170
c.	Efectos Topográficos Sobre el Flujo de Aire.	171
d.	Sinergia de Factores	175
4.1.8.3.	Tráfico y Topografía Local	179
4.1.8.4.	Monitoreo de PM_{10}	180
a.	Evaluación de Precisión	183
b.	Evaluación de Precisión	184
c.	Evaluación de Comparación	184
4.2.	Marco Legal	189
4.2.1.	Marco Legal Internacional	189

4.2.2.	Marco Legal Nacional	193
5.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	199
5.1.	Hipótesis, Variables Y Objetivos	199
5.1.1.	Hipótesis	199
5.1.2.	Variables	199
5.1.2.1.	Dependientes	199
5.1.2.2.	Independientes	199
5.1.2.3.	Intervinientes	199
5.1.3.	Objetivos	200
5.2.	Métodos, Materiales y Equipos	200
5.2.1.	Metodología	200
5.2.1.1.	Estaciones de Muestreo	200
5.2.1.2.	Recolección de Muestras	201
5.2.1.3.	Manejo de Muestras	201
5.2.1.4.	Cálculo y Manejo de Datos	201
5.2.2.	Materiales y Equipos	202
5.3.	Tipo de Estudio	203
5.4.	Diseño de la Investigación	204
5.5.	Monitoreo	205
5.5.1.	Área de Estudio	205
5.5.2.	Estaciones de Muestreo	206
5.5.3.	Campañas de Muestreo	212
5.6.	Procedimientos	212
5.6.1.	Ubicación del Equipo en las Estaciones de Muestreo	212
5.6.2.	Operación del Equipo Muestreador de Aire Ambiental	213
5.6.3.	Preparación del Filtro	213
5.6.4.	Instalación de los Filtros en el Equipo de Muestreo	213
5.6.5.	Recolección de Muestras	214
5.6.6.	Medición del Peso de PM ₁₀ Muestreado	214
5.6.7.	Cálculos y Manejo de Datos	215
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	223
6.1.	Cumplimiento del Reglamento Estándares Nacionales de Calidad	224

	Ambiental del Aire	
6.2.1.	Promedio Aritmético Anual = $50\mu\text{g}/\text{m}^3$	224
6.2.2.	Promedio 24 Horas (NE más de 3 veces/año) = $150\mu\text{g}/\text{m}^3$	227
6.3.	Calidad De Aire En La Ciudad De Pisco Y Alrededores	228
6.3.1.	Promedio Aritmético Anual = $50\mu\text{g}/\text{m}^3$	231
6.3.2.	Promedio 24 Horas (NE más de 3 veces/año) = $150\mu\text{g}/\text{m}^3$	234
6.4.	Distribución Espacial de la Concentración de PM_{10} en la Zona de Estudio	235
6.4.1.	Homogenización De Datos Por Estación De Muestreo	235
6.4.2.	Distribución de La Concentración de PM_{10} en el Área de Estudio	240
6.4.3.	Concentración de PM_{10} en Zonas Urbanizadas dentro del Área de Estudio	246
6.4.4.	Zonas Especiales de Concentración de PM_{10}	248
6.4.4.1.	Ciudad de Pisco	248
6.4.4.2.	Límite Pisco – San Andrés	255
6.4.4.3.	Otras Fuentes de Generación de PM_{10}	257
6.4.5.	Relaciones entre la Concentración de PM_{10} y los Parámetros Meteorológicos en la Zona de Estudio	259
6.4.5.1.	Humedad Relativa	259
6.4.5.2.	Vientos	262
6.4.5.3.	Velocidad del Viento	263
6.4.5.4.	Dirección del Viento	267
6.4.5.5.	Vientos Paracas	268
6.4.5.6.	Temperatura	274
6.4.6	Población Expuesta a Niveles Elevados de Concentración de PM_{10}	276
	CONCLUSIÓN	279
	RECOMENDACIONES	286
	BIBLIOGRAFIA	290

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Régimen térmico.	5
Tabla 1.2. Tipo de vientos.	7
Tabla 1.3. Humedad relativa.	9
Tabla 1.4. Entidades que monitorean parámetros ambientales en Pisco.	17
Tabla 1.5. Valores Unitarios Utilizados en la Valoración Monetaria.	34
Tabla 1.6. Mortalidad y Morbilidad por contaminación por PM ₁₀ evitada con cronograma 20 años lineal en un año seleccionado (Número de casos).	35
Tabla 1.7. Beneficios totales en salud (mortalidad y morbilidad por contaminación por PM ₁₀ evitada en 20 años.	35
Tabla 1.8. Zonas de mayor contaminación atmosférica por partículas.	44
Tabla 2.1. Emisiones de contaminantes del parque vehicular de la cuenca atmosférica de Pisco.	49
Tabla 2.2. Inventario de emisiones de fuentes móviles. Según emisiones (tm/año), tipo de vehículo y uso. Pisco – 2004.	50
Tabla 2.3. Resumen de manzanas tomadas por distrito.	52
Tabla 2.4. Antigüedad de Vehículos Públicos y Privados.	53
Tabla 2.5. Marco censal de empresas y establecimientos – III CENEC.	55
Tabla 2.6. Categorías de Fuentes de Emisión Fijas en la Cuenca Atmosférica de Pisco.	56
Tabla 2.7. Proyección de la población urbana ubicada en la cuenca atmosférica de Pisco.	57
Tabla 2.8. Inventario de Emisiones Anuales de Fuentes Fijas de la Ciudad de Pisco. 2002.	59
Tabla 2.9. Emisiones de Fuentes Fijas en la Cuenca Atmosférica de Pisco en el año 2003.	60
Tabla 2.10. Emisiones de Contaminantes al Aire en la Ciudad de Pisco en el año 2002.	61

Tabla 2.11. Niveles de Alerta para Contaminantes Críticos.	62
Tabla 2.12. Frecuencia de Casos de IRA Y SOB en menores de 5 años en la Región Ica y la provincia de Pisco, atendidos en los establecimientos del MINSA. Años 2002, 2003,2004.	65
Tabla 2.13. Tasas de morbilidad por IRAS en menores de 5 años en Región Ica y la provincia de Pisco, Atendidos en los establecimientos del MINSA en los años 2002, 2003,2004.	66
Tabla 2.14. Tasas de morbilidad por SOB en menores de 5 años en Región Ica y la provincia de Pisco, Atendidos en los establecimientos del MINSA. Años 2002, 2003,2004.	66
Tabla 2.15. Frecuencia Absoluta de muertes en la provincia de Pisco en los años 2003 y 2004.	69
Tabla 2.16. Cálculo de número de casos de muertes por PM10 que podrían ser evitadas Año 2003,2004. Provincia de Pisco.	70
Tabla 4.1. Concentración de Compuestos en el Aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).	77
Tabla 4.2. Relación entre el parámetro de estabilidad n y la condición de estabilidad de la atmósfera.	102
Tabla 4.3. Relación entre la diferencia de temperatura y el parámetro p par alas capas de aire con un espesor de 5 a 400 pies, donde $T = T_{400} - T_5 .$	102
Tabla 4.4. Velocidad y dirección del viento correspondiente a una ciudad hipotética, para un mes especificado.	107
Tabla 4.5. Fuentes globales, concentraciones y reacciones atmosféricas de los gases trazas (Robinson and Robbins, 1969).	117
Tabla 4.6. Tabla de Grob et al. de Concentración Media de Hidrocarburos en Atmósfera Humana (Seoáñez, 2002).	122
Tabla 4.7. Fuentes Básicas del CO Atmosférico (Seoáñez, 2002).	123
Tabla 4.8. Contaminantes atmosféricos por fuente.	141
Tabla 4.9. Relaciones entre los métodos de muestreo y factores ambientales.	186
Tabla 4.10. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire.	196
Tabla 4.11. Valores de tránsito.	197
Tabla 4.12. Valores referenciales.	197

Tabla 5.1. Ubicación de las estaciones de muestreo en la recopilación de muestras.	208
Tabla 5.2. Monitoreo de la concentración de PM ₁₀ . Resultados del muestreo de la calidad de aire en la ciudad de Pisco y alrededores.	218
Tabla 6.1. Parámetros estadísticos descriptivos de la concentración de PM ₁₀ en el área de estudio.	224
Tabla 6.2. Resultados de prueba T-student y Z y estimación del intervalo de confianza para el promedio de concentración de PM ₁₀ (μg/m ³).	226
Tabla 6.3. Resultados de la prueba de rango con signo de Wilcoxon.	226
Tabla 6.4. Resultados de la prueba estadística binomial para la proporción de días con PM ₁₀ > 150 μg/m ³ .	227
Tabla 6.5. Estadísticos descriptivos de la muestra según la ubicación del punto de muestreo.	228
Tabla 6.6. Prueba estadística Z y T para la igualdad de medias. Pisco vs. Distritos alrededores.	229
Tabla 6.7. Prueba de Levene para la igualdad de varianzas.	229
Tabla 6.8. Rangos correspondientes a la prueba de Kruskal-Wallis.	230
Tabla 6.9. Estadísticos de contraste correspondientes a la prueba de Kruskal-Wallis. ^(a)	230
Tabla 6.10. Resultados de la prueba T-student. Media aritmética de la concentración de PM ₁₀ según la ubicación del punto de muestreo.	231
Tabla 6.11. Parámetros estadísticos de la prueba de rango con signo de Wilcoxon.	231
Tabla 6.12. Prueba estadística binomial. Proporción de días con PM ₁₀ >150 μg/m ³ según la ubicación de la estación de muestreo.	234
Tabla 6.13. Estadística descriptiva de la concentración de PM ₁₀ según estación de muestreo.	237
Tabla 6.14. Muestras discriminadas por exceder la distribución de las estaciones de muestreo.	238
Tabla 6.15. Estadísticos descriptivos no discriminados según estación de muestreo ^a .	239
Tabla 6.16. Distribución de áreas según concentración de PM ₁₀ a que se encuentran expuestas.	241

Tabla 6.17. Concentración de PM_{10} promedio según áreas urbanizadas.	246
Tabla 6.18. Pruebas estadísticas no paramétricas para la comparación de PM_{10} según distritos.	247
Tabla 6.19. Pruebas estadísticas no paramétricas para la comparación de estaciones de muestreo.	250
Tabla 6.20. Correlación entre en coeficiente de dispersión (k) de la concentración de PM_{10} y la velocidad del viento en las estaciones de muestreo en el distrito de Pisco.	266
Tabla 6.21. Alertas de vientos Paracas emitidas por SENAMHI en el intervalo de muestreo.	270
Tabla 6.22. Tabla de contingencia entre la dispersión de valores de PM_{10} y la ocurrencia de vientos con velocidad mayor a 10 m/s.	273
Tabla 6.23. Medidas simétricas de contingencia.	273
Tabla 6.24. Porcentaje de población expuesta a niveles de PM_{10} indicados según distrito.	276
Tabla 6.25. Población estimada (al año 2007) expuesta a niveles de PM_{10} según distrito.	277

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Mapa del periodo colonial.	2
Figura 1.2. División política de Pisco.	4
Figura 1.3. Cuenca atmosférica de Pisco, nótese la línea divisoria roja.	6
Figura 1.4. Principales corrientes de viento.	8
Figura 1.5.a. Cronograma de descontaminación de PM ₁₀ .	33
Figura 1.5.b. Mortalidad evitada con cronograma de descontaminación de PM ₁₀ .	34
Figura 1.5.c. Morbilidad con cronograma de descontaminación de PM ₁₀ .	34
Figura 2.1. Inventario de Emisiones de Fuentes Móviles por Tipo de Uso del Vehículo. PISCO. 2004.	49
Figura 2.3. Composición del Parque Automotor Público en Pisco. Año 2004.	52
Figura 2.4. Composición del Parque Automotor Privado en Pisco. Año 2004.	53
Figura 2.5. Composición de Vehículo Flotantes que ingresan a la Cuenca Atmosférica de Pisco.	54
Figura 2.6. Gráfico de la proyección de la población urbana en la cuenca atmosférica de Pisco.	57
Figura 2.7. Densidad Poblacional en la Cuenca Atmosférica de Pisco.	58
Figura 2.8. Emisiones Anuales de Fuentes Fijas de la Ciudad de Pisco. 2002.	59
Figura 2.9. Emisiones de Fuentes Fijas en la Cuenca Atmosférica de la ciudad de Pisco.	60
Figura 2.10. Emisiones de Contaminantes al Aire en la Ciudad de Pisco en el año 2003.	61
Figura 2.11. Concentraciones de Partículas Totales en Suspensión.	63

Figura 2.12. Concentraciones de $PM_{2.5}$.	64
Figura 2.13. Canal endémico de las Infecciones Respiratorias Agudas Dirección Regional de Salud ICA, Periodo 1999-2003-S.E.52-2004.	67
Figura 2.14. Canal endémico de las Infecciones Respiratorias Agudas Dirección Regional de Salud ICA, Periodo 1999-2004-S.E.49-2005.	68
Figura 2.15. Tasa de Mortalidad (x 10,000) Pisco y Resto de Ica. Según categoría de Edad. 2004.	68
Figura 2.16. Tasa de Muerte (x 10,000) Pisco. Según categoría de Edad. 2003-2004.	70
Figura 4.1. Fotografía tomada por Terra, las zonas rojas representan la mayor contaminación por CO.	73
Figura 4.2. Porcentaje de la masa total por debajo de los 80 Km.	75
Figura 4.3. Estructura Térmica de la Atmósfera.	76
Figura 4.4. Distribución y dirección de vientos en la Tierra.	79
Figura 4.5. Dinámica de convección térmica normal.	80
Figura 4.6. Inversión térmica y dirección de la dispersión de componentes en el aire.	80
Figura 4.7. A, gradiente térmica normal; B, formación de inversión térmica	80
Figura 4.8. (a) Variación de la insolación con las diferentes estaciones. (b) Variación de la insolación con la situación geográfica.	82
Figura 4.9. Variación con el ángulo de incidencia des espesor de la atmósfera atravesado por la radiación solar.	82
Figura 4.10. Efectos de las diversas fuerzas sobre la dirección del viento, en relación con las isobaras en la atmósfera.	83
Figura 4.11. Efecto de la fuerza de fricción en la capa límite planetaria, sobre la dirección del viento.	84
Figura 4.12. Equilibrios de fuerzas en la proximidad de las regiones de alta y baja presión.	85
Figura 4.13. Efecto de las fuerzas de fricción en la capa límite planetaria, sobre la dirección del viento a diversas alturas.	86
Figura 4.14. Perfil de temperatura de la atmósfera normal, comparada con el gradiente de temperatura adiabática.	90
Figura 4.15. Tasa de cambio relacionada con la estabilidad atmosférica (tasa de cambio ambiental –, tasa de cambio adiabática --).	92

Figura 4.16. El proceso adiabático, por el que se define la temperatura potencial, ϕ .	93
Figura 4.17. Ilustraciones de a) inversión por asentamiento, b) inversión por radiación y c) combinación de inversiones por asentamiento y por radiación.	97
Figura 4.18. Sección transversal del tiempo para la temperatura promedio ($^{\circ}$ F) hasta una altura de 5000 pies, setiembre y octubre de 1950, Oak Ridge Tennessee.	98
Figura 4.19. Cambio de perfil de velocidad del viento con la estabilidad.	100
Figura 4.20. Efecto de la rugosidad del terreno sobre el perfil de velocidad del viento. Los valores a lo largo de las curvas representan porcentajes del valor de la gradiente del viento.	101
Figura 4. 21. Establecimiento de la altura máxima de mezclado (AMM) en diversas condiciones atmosféricas (perfil adiabático--, perfil ambiental --).	105
Figura 4.22. Rosa de los vientos hipotética para los datos de la tabla 4.4.	106
Figura 4.23. (a) Representación típica de los datos de velocidad del viento, por medio de una rosa de los vientos. (b) Una rosa de los vientos diurna y nocturna para la ciudad de Nueva York, que muestra el efecto diurno de la brisa marina.	108
Figura 4.24. Perfiles típicos de velocidad, temperatura y forma de las plumas en el sistema de coordenadas x-z, para diversas condiciones atmosféricas. (Tasa de cambio adiabática seca, --; tasa de cambio ambiental, --).	112
Figura 4.25. Distribución general del patrón de flujo alrededor de un edificio con aristas agudas.	113
Figura 4.26. (a) El efecto aerodinámico de un edificio situado en la dirección de flujo del viento con respecto a una chimenea, sobre la dispersión del efluente gaseoso. (b) efectote una chimenea montada sobre o inmediatamente adyacente a un edificio sobre la dispersión en la dirección del viento.	114
Figura 4.27. Dibujo que muestra el patrón de circulación correspondiente a una isla térmica urbana.	115
Figura 4.28. Dinámica de la formación y acción de la lluvia ácida.	145

Figura 4.29. Invasión de material particulado africano registrada el 05/03/98 (imagen satélite facilitada por SeaWIFS Project, NASA GSF y ORBIMAGE).	150
Figura 4.30. Imágenes comparativas de las partículas respirables.	151
Figura 4.31. Partículas naturales.	154
Figura 4.32. Partículas antropogénicas.	155
Figura 4.33. Conductos respiratorios del pulmón.	160
Figura 4.34. Macrófago (amarillo) atrapando partículas extrañas como polvo, amianto y bacterias.	164
Figura 4.35. Partículas generadas por combustión de vehículos motorizados.	167
Figura 4.36. Las brisas diurna y nocturna (Espert y López, 2004).	171
Figura 4.37. Estela generada por los obstáculos (Espert y López, 2004).	172
Figura 4.38. Distancia mínima para evitar la influencia de la cercanía de los obstáculos a la chimenea (Espert y López, 2004).	173
Figura 4.39. Efecto del relieve del terreno sobre el penacho de contaminantes (Espert y López, 2004).	174
Figura 4.40. Formas de penachos en modelamiento físico (Espert y López, 2004).	175
Figura 4.41. La dirección del viento genera vórtices dependiendo de la topografía del terreno local. S es el punto de monitoreo.	180
Figura 4.42. Relaciones entre los métodos de muestreo y factores ambientales.	187
Figura 5.1. Filtros de microfibra de cuarzo (37mm de diámetro y 5 μ m de poros) y portafiltros.	202
Figura 5.2. Equipo Minivol Portable Air Sampler® instalados en estación de muestreo.	203
Figura 5.3. Área de estudio, límites de los distritos incluidos y cuenca atmosférica de Pisco.	205
Figura 5.4. Ubicación de estaciones de muestreo en el área de estudio.	207
Figura 5.5. Vista satelital de la ubicación de las estaciones de monitoreo en el distrito de Pisco (Estaciones E-1 al E-9).	209
Figura 5.6. Vista satelital de la ubicación de las estaciones de monitoreo en el distrito de Paracas. De arriba hacia abajo (a) Estación E-10. (b)	210

Estación E-12. Fuente: Google Earth v.4.0.2693 beta.	
Figura 5.7. Vista satelital de la ubicación de las estaciones de monitoreo en el distrito de San Andrés (Estaciones E-11 y E-13).	211
Figura 5.8. Vista satelital de la ubicación de las estaciones de monitoreo en el distrito de Túpac Amaru (Estaciones E-14 y E-15).	211
Figura 5.9. Vista satelital de la ubicación de las estaciones de monitoreo en el distrito de San Clemente (Estaciones E-16 y E-17).	212
Figura 6.1. Histograma de frecuencias y probabilidades acumuladas correspondientes a las muestras de concentración de PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en la zona.	225
Figura 6.2. Comparación de histogramas para la concentración promedio de PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de las muestras obtenidas en la ciudad de Pisco y los distritos alrededores.	233
Figura 6.3. Diagrama de cajas. Concentración de PM ₁₀ según estación de muestreo en la zona de estudio.	236
Figura 6.4. Diagrama de cajas. Concentración de PM ₁₀ según estación de muestreo para los valores no discriminados.	238
Figura 6.5. Distribución de la concentración de PM ₁₀ en el área de estudio.	243
Figura 6.6. Vista satelital del área de estudio.	245
Figura 6.7. Diagrama de cajas de concentración de PM ₁₀ según distritos.	248
Figura 6.8. (a) Distribución de la concentración de PM ₁₀ en el área urbana de la ciudad de Pisco (b) Vista satelital.	253
Figura 6.9. (a) Concentración de PM ₁₀ en la zona comercial de la ciudad de Pisco (b) Vista de las vías públicas y el tráfico en la zona.	254
Figura 6.8. (a) Concentración de PM ₁₀ la zona norte del distrito de San Andrés. Nótese la ubicación de las empresas pesqueras (b) Vista satelital de la zona.	256
Figura 6.9. Vista satelital de otras fuentes de generación de contaminantes en la zona de estudio. (a) Planta de Fraccionamiento de GLP (Pluspetrol). (b.1) Industrias siderúrgicas (Aceros Arequipa). (b.2.) Fundiciones de estaño (FUNSUR).	258
Figura 6.10. Dispersión de PM ₁₀ (k) e inversa de la H.R. (H.R.^{-1}) en las estaciones de muestreo en Pisco entre febrero y abril del 2005 (primera campaña de muestreo).	260

Figura 6.11. Dispersión de PM_{10} (k) e inversa de la H.R. ($H.R.^{-1}$) en las estaciones de muestreo en Pisco entre agosto 2006 y enero 2006 (segunda y tercera campañas de muestreo)	261
Figura 6.12. Dispersión de PM_{10} (k) y humedad relativa (%) en las estaciones de muestreo en San Andrés, Paracas, San Clemente y Túpac Amaru entre abril y mayo del 2005 (primera campaña de muestreo).	262
Figura 6.13. Dispersión de PM_{10} (k) y velocidad del viento (km/h) en las estaciones de muestreo del distrito de Pisco entre febrero y abril del 2005 (primera campaña de muestreo).	263
Figura 6.14. Dispersión de PM_{10} (k) y velocidad del viento (km/h) en las estaciones de muestreo del distrito de Pisco entre agosto 2005 y enero del 2006 (segunda campaña de muestreo).	264
Figura 6.15. Dispersión de PM_{10} (k) y velocidad del viento (km/h) en las estaciones de muestreo de los distritos de Paracas, San Andrés, Túpac Amaru y San Clemente, entre abril y mayo del 2005 (primera campaña).	265
Figura 6.16. Dirección predominante del viento en la cuenca atmosférica de Pisco. Adaptado de Plan "A limpiar el aire de la ciudad de Pisco", CONAM, 2006, utilizando imágenes satelitales del software Google Earth v.4.0.2693.	267
Figura 6.17. Reducción de la visibilidad producida por la suspensión y transporte de partículas durante la ocurrencia del fenómeno de vientos Paracas. Imágenes referidas al Grupo Aéreo 51 Pisco. Fuerza Aérea del Perú.	269
Figura 6.18. Dispersión de PM_{10} (k) en función del tiempo en las estaciones de muestreo del distrito de Pisco entre febrero y abril del 2005 comparados con el pronóstico de vientos Paracas y días con velocidades máximas sostenidas de viento mayores a 10 m/s.	270
Figura 6.19. Dispersión de PM_{10} (k) en función del tiempo en las estaciones de muestreo de los distritos de Paracas, San Andrés, Túpac Amaru y San Clemente entre abril y mayo del 2005 comparados con el pronóstico de vientos Paracas y días con velocidades máximas sostenidas de viento mayores a 10 m/s.	271
Figura 6.20. Dispersión de PM_{10} (k) en función del tiempo en las estaciones de muestreo del distrito de Pisco entre agosto del 2005 y enero	272

del 2006 comparados con el pronóstico de vientos Paracas y días con velocidades máximas sostenidas de viento mayores a 10 m/s.

Figura 6.21. Dispersión de PM_{10} (k) y temperatura ambiental ($^{\circ}K$) en las estaciones de muestreo del distrito de Pisco entre febrero y abril del 2005 (primera campaña de muestreo). 274

Figura 6.22. Dispersión de PM_{10} (k) y temperatura ambiental ($^{\circ}K$) en las estaciones de muestreo de los distritos de Paracas, San Andrés, Túpac Amaru y San Clemente, entre abril y mayo del 2005 (primera campaña de muestreo). 275

Figura 6.23. Dispersión de PM_{10} (k) y temperatura ambiental ($^{\circ}K$) en las estaciones de muestreo del distrito de Pisco entre agosto del 2005 y enero del 2006 (segunda campaña de muestreo). 275

Figura 6.24. Mapa de densidad poblacional de los distritos de Pisco, Paracas, Túpac Amaru, San Andrés y San Clemente. Fuente: Adaptado de Mapa de Densidad Poblacional en “Sistematización y Georeferenciación de Estudios Desarrollados por el Gesta Zonal Aire de la Ciudad de Pisco” (GD Sistemas SRL., 2004). 278

Introducción

La contaminación atmosférica afecta a la salud ambiental global. En la actualidad se emiten cantidades indiscriminadas de gases y partículas potencialmente tóxicas para la salud humana y el ambiente, aquellas sustancias a través del tiempo se constituyen en un infranqueable obstáculo para el desarrollo sostenible del ecosistema.

Los contaminantes del aire se clasifican en partículas suspendidas (polvos, neblinas, humos), contaminantes gaseosos (gases y vapores) y olores. El caso de las partículas la forma de medición es a través de dispositivos capaces de seleccionar el tamaño de las mencionadas. Así, la masa de partículas con un diámetro menor a $10\ \mu\text{m}$ se puede determinar como un índice de la concentración de la masa de partículas que pueden penetrar en las vías respiratorias del ser humano. Esta fracción respirable de los PTS (partículas totales en suspensión) puede ingresar a los tejidos pulmonares causando problemas respiratorios y exacerbar enfermedades cardiovasculares. Numerosos estudios epidemiológicos han indicado una concreta asociación entre la elevada concentración de PM_{10} y el incremento de morbilidad y mortalidad.

Las partículas finas y gruesas provienen de fuentes diferentes y tienen mecanismos de formación distintos, aunque es probable que haya cierta superposición. Se pueden encontrar elementos biológicos en estas partículas como polen, esporas y bacterias. Estas formas de contaminantes tienen diferentes comportamientos aerodinámicos los cuales se deben considerar en el monitoreo y evaluación de sus radios de acción.

El documento proporciona información de las concentraciones de PM_{10} en la ciudad de Pisco y sus alrededores comparándolas con la base legal estipulada en la nación. El diagnóstico de dicha zona, como a continuación se describirá, es la base para las acciones siguientes a considerar en programas de monitoreo ambiental y aseguramiento de la calidad del aire.

1. ANTECEDENTES

1.1. INFORMACION GENERAL

“Las reseñas históricas nos cuentan que en 1820, José de San Martín desembarcó en una playa cercana (Paracas) al puerto de Pisco. En la ciudad destaca la casa donde el libertador creó la primera bandera del Perú.

Pisco es un lugar que se encontró dentro de territorio de las culturas prehispánicas Paracas y Nazca, incluso hacia el 10.000 a.C., se produjo el primer asentamiento sedentario debido a las ingentes riquezas marinas que los antiguos peruanos recogían. En ese sentido, sus vestigios culturales e históricos son amplios. Con el establecimiento del Virreinato del Perú, el puerto de Pisco sirvió como punto de salida del azogue de Huancavelica y del Pisco que se producía en los valles cercanos.

Actualmente, tanto su puerto como su agricultura y su industria vitivinícola y del pisco destacan desde los primeros años del período colonial. Esta ciudad peruana aparece en los primeros mapas conocidos del siglo XVI”. (Wales & Sanger, 2006).



Figura 1.1. Mapa del periodo colonial.

Existe una división para nombrar dos partes de la ciudad las que comprenden tanto el pueblo, conocido como "Pisco pueblo" como el puerto y el malecón, conocidos como "Pisco playa". Actualmente cuenta con

actividad industrial variada y en aumento debido a la influencia de la nueva industria del gas natural que se viene desarrollando en el litoral pisqueño.

El Instituto del Mar del Perú nos dice que "La provincia de Pisco es un importante centro industrial y agrícola de la costa peruana, debido a las importantes características físicas (geomorfología, climatología, localización, biodiversidad entre otros), que posibilitan la realización de un gran número de actividades humanas, originando de esta forma una ocupación expansiva del territorio. Es importante resaltar la enorme riqueza de especies marinas que habitan sus costas motivando el desarrollo de una gran actividad pesquera y por otro lado aunado a dicha biodiversidad, existe en la zona un importante potencial de recursos culturales y paisajísticos que constituye la base para una actividad turística de gran futuro.

La dinámica comercial e industrial es intensa durante todo el año, basado en la disponibilidad y demanda de los recursos naturales existentes y otros productos de la zona. Cabe destacar la zona marino-costera, como una de las más dinámicas y controvertidas por la mayor concentración de la población y las mayores alternativas de desarrollo" (IMARPE, 2006).

1.2. AREA DE ESTUDIO

La región de Ica se encuentra conformada por cinco provincias, una de ellas Pisco, se ubica en la parte nor central de la región y limita, al norte con la provincia de Chincha Alta, al este con la región Huancavelica, al sur con la provincia de Ica y al oeste con el Océano Pacífico. Posee una superficie de 3957.15 km².

Con una población de 128,621 Pisco se encuentra ubicado en la parte central y occidental del Perú a 17 msnm; latitud sur 13° 42'24", latitud oeste 76° 12'00" y a una distancia de la capital de la republica de 241 km.

Sus distritos son: Pisco, Huancano, Humay; Independencia, Paracas, San Andrés, San clemente y Túpac Amaru Inca.

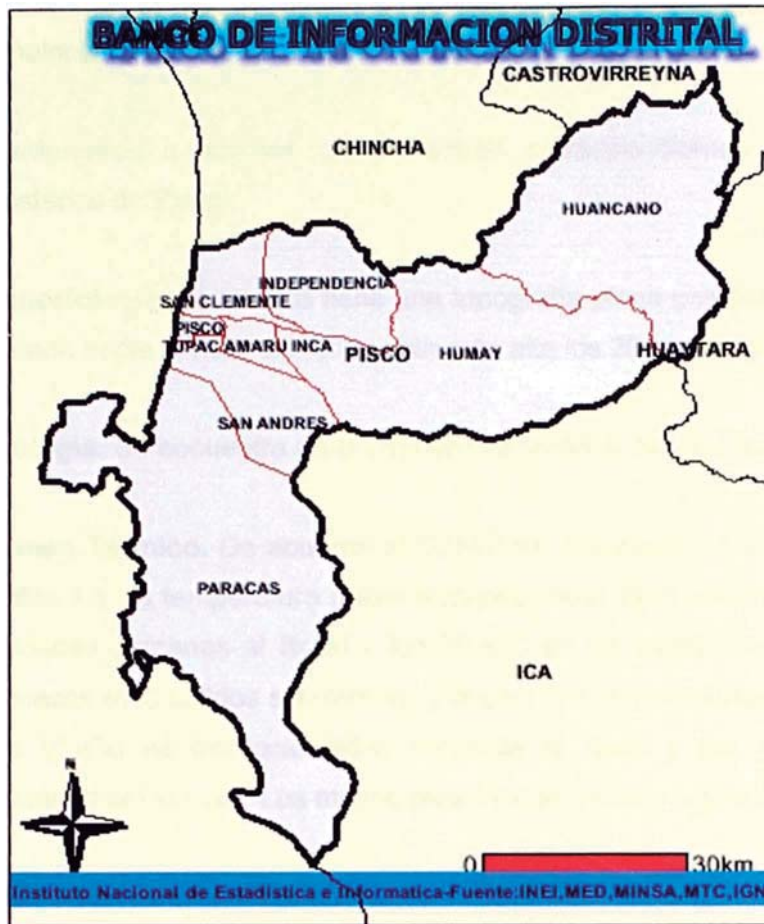


Figura 1.2. División política de Pisco.

1.3. GEOGRAFIA Y CLIMA

1.3.1. Delimitación de la Cuenca Atmosférica

Dado que los resultados de las mediciones tomadas, específicamente las concentraciones, se ven influidas por las condiciones climáticas de la zona, es muy importante delimitar nuestra área de estudio

Definiremos pues Cuenca Atmosférica y de acuerdo a Davidova Belitskaya diremos que “Esta se encuentra delimitada por los obstáculos topográficos de origen natural (líneas costeras, formaciones montañosas etc.), de tal manera que dentro de esta se modifica la circulación general de la atmósfera sobre la superficie (capa límite de la atmósfera), dando lugar a la formación de los vientos locales, diferentes del flujo de la atmósfera libre, se determina *cuenca atmosférica*. Este tipo de vientos determina el transporte de las masas de aire dentro de la región. Por lo tanto, son responsables en

la dirección de su transporte y en los procesos de dispersión (o de acumulación) de los contaminantes del aire" (Davidova).

Procederemos a dar las características correspondientes a la cuenca atmosférica de Pisco.

1.3.1.1. Geomorfología. La cuenca tiene una topografía plana con pendiente suave orientada hacia el mar, siendo la cota más alta los 200 m.s.n.m.

1.3.1.2. Hidrología. Se encuentra en la cuenca hidrográfica del río Pisco.

1.3.1.3. Régimen Térmico. De acuerdo al SENAMHI obtenemos datos y véase en la Tabla 1.1 la temperatura máxima media anual varía entre 21.6°C en las localidades cercanas al litoral y los 25.4°C en las localidades del interior. Los meses más cálidos son febrero y marzo. La temperatura mínima varía entre 15.4°C en las localidades cercanas al litoral y los 19.4°C en las localidades del interior. Los meses más fríos son julio y agosto.

Tabla 1.1. Régimen térmico.

Temperaturas medias en la cuenca atmosférica de Pisco

	VERANO	INVIERNO	ANUAL
Máximo	25.4°C	19.4 °C	21.1 °C
Mínimo	21.6 °C	15.4 °C	18.8 °C

Fuente: SENAMHI

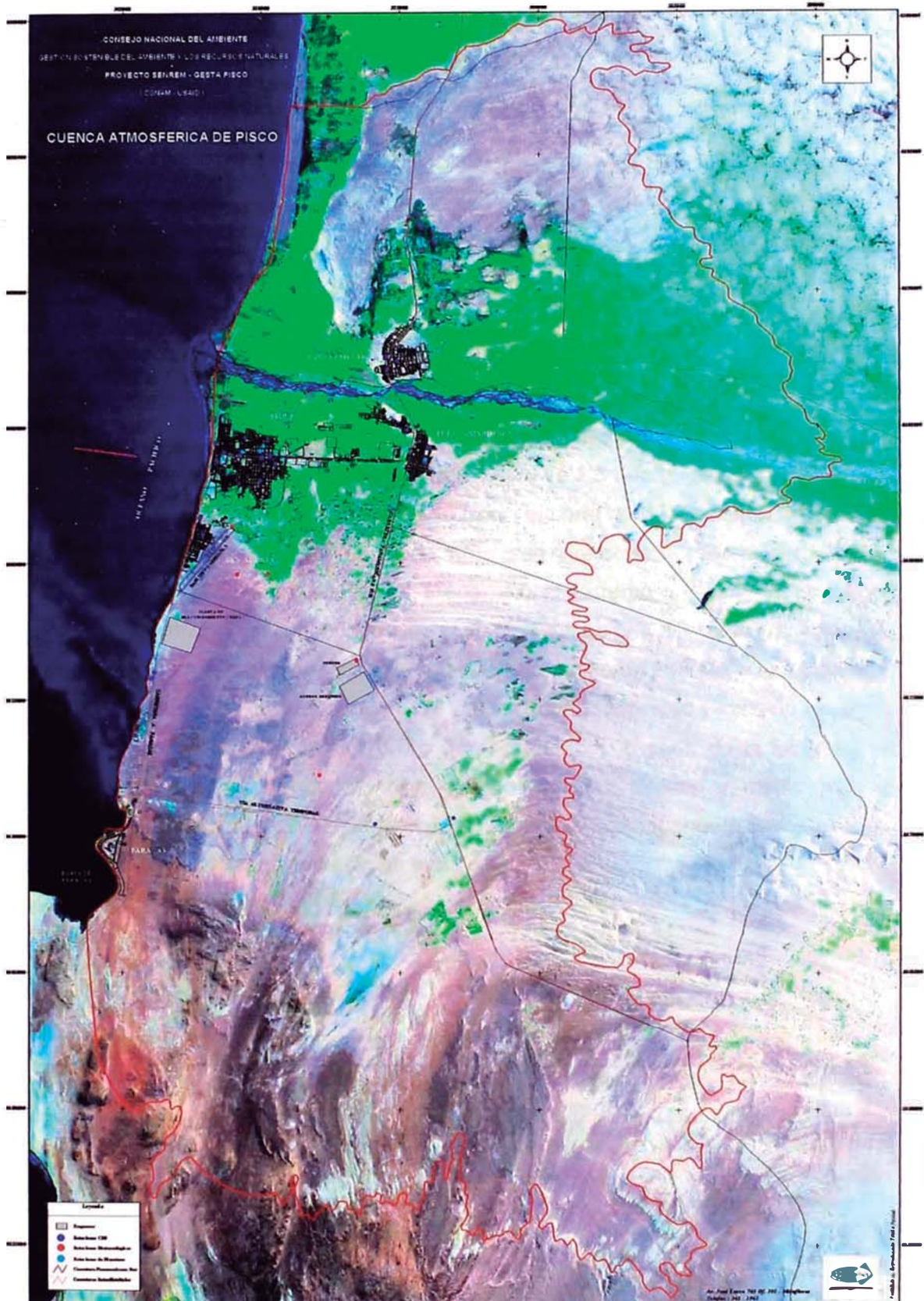


Figura 1.3. Cuenca atmosférica de Pisco, nótese la línea divisoria roja.

1.3.1.4. Régimen Hídrico. La precipitación media anual varía entre los 0.9 mm en las localidades cercanas al litoral y los 0.1 mm en las localidades del interior (SENAMHI).

1.3.1.5. Vientos. CORPAC y SENAMHI nos muestran detalles acerca del viento y su dirección para la ciudad de Pisco, en la Cuenca Atmosférica de la ciudad la velocidad media anual del viento en la zona costera es de 3.0 m/seg., con dirección predominante Sur, Suroeste (Estación Corpac) y en la Isla Chincha Norte la dirección predominante Nor, Noreste con velocidad media de 3.5 m/seg.

A nivel local, en la zona costera ubicada al extremo sur de la Cuenca atmosférica de Pisco, el viento adquiere una velocidad predominante del sur oeste (SW) y una velocidad media anual de 2.6 m/seg (Estación CORPAC), en el extremo costero orientado hacia el norte de la cuenca, el viento tiene una velocidad media anual de 4.6 m/seg y dirección predominante del Sur oeste (Capitanía de Puerto- Pisco). En el extremo nor este de la cuenca orientados hacia el continente, el viento registra una dirección predominante del nor oeste (NW), con una velocidad promedio de 2.9 m/s, y en el extremo sur este de la cuenca el viento presenta una velocidad promedio anual de 1.4 m/s y dirección nor oeste (NW) (Lanchas). A partir de la tabla 1.2 se observa las componentes del viento máximo, mínimo y medio para la estación de Pisco, registrándose en promedio la componente SW y la mayor intensidad en la estación de verano.

Tabla 1.2. Tipo de vientos.

Variaciones de la Velocidad y Dirección del viento en la Estación Pisco CORPAC

Viento	Verano		Invierno		Anual	
	Dirección	Velocidad m/seg.	Dirección	Velocidad m/seg.	Dirección	Velocidad m/seg.
Medio	SW	3.1	SW	2.0	SW	2.6
Máximo	SW	3.4	SW	2.2		
Mínimo	SW	2.9	SW	1.9		

Fuente: SENAMHI

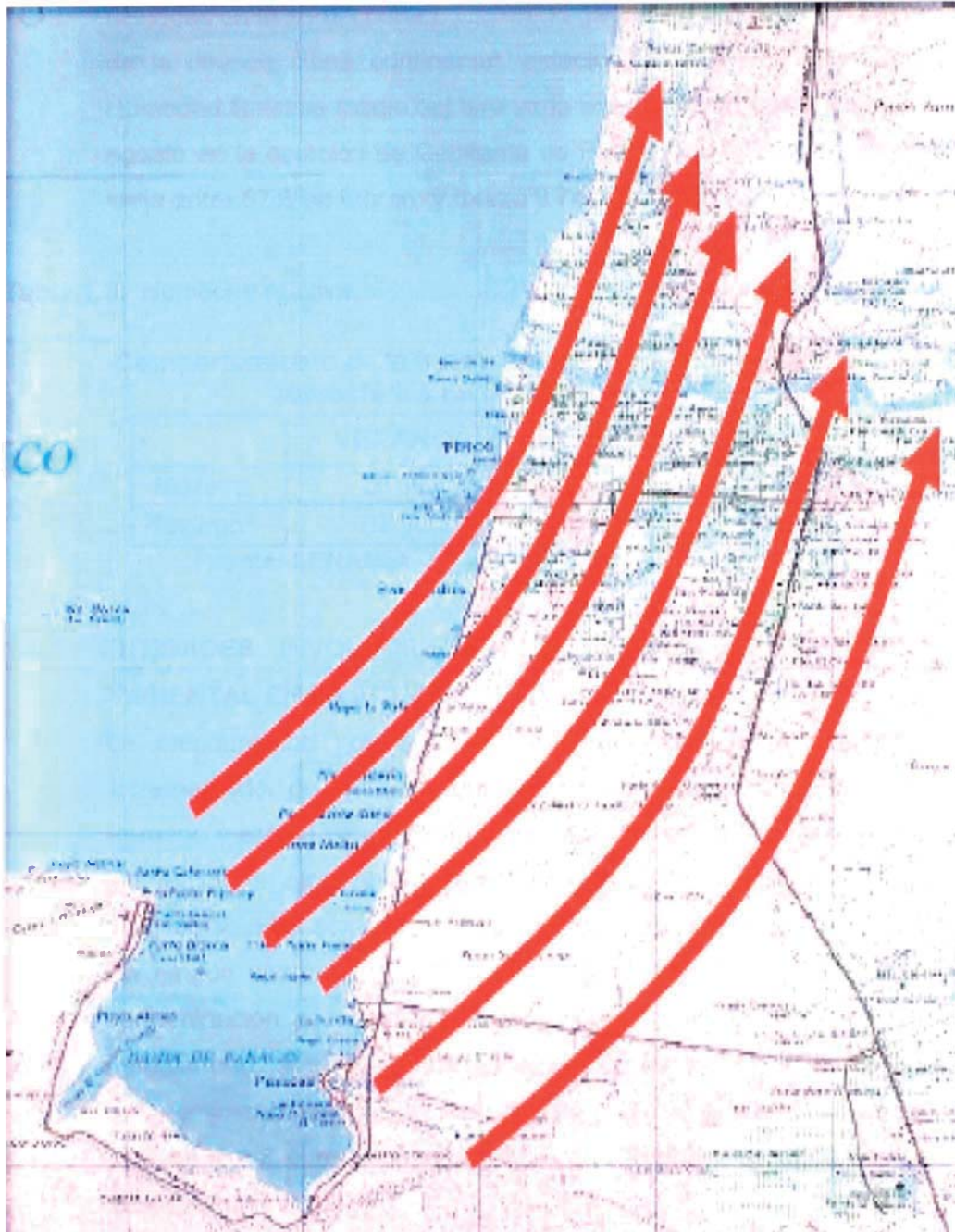


Figura 1.4. Principales corrientes de viento.

1.3.1.6. Humedad Relativa. En la tabla 1.3 se presenta el comportamiento promedio anual de la humedad relativa media; donde se observa que Pisco, por su configuración especial presenta valores inferiores de humedad relativa que su entorno. El contenido de humedad atmosférica es mayor en el invierno, el cual puede fluctuar en promedio entre 74 a 87%, y en el verano entre 67 a 85%. Observando los comportamientos extremos de la humedad del aire en los meses de verano e invierno en las estaciones

ubicadas en la zona costera: Capitanía de Puerto de Pisco y hacia el interior de la cuenca, zona continental, estación de FUNSUR, se tiene que la Humedad Relativa media del aire varía entre 85% en enero y 87% en julio y agosto en la estación de Capitanía de Puerto. En la estación de FUNSUR, varía entre 67% en febrero y marzo y 74 % en junio (SENAMHI).

Tabla 1.3. Humedad relativa.

Comportamiento de la humedad relativa media en la cuenca atmosférica de Pisco

	VERANO	INVIERNO	ANUAL
Máximo	85 %	87 %	86 %
Mínimo	67 %	74%	72 %

Fuente: SENAMHI

1.4. ENTIDADES INVOLUCRADAS EN ACTIVIDADES DE MONITOREO AMBIENTAL EN LA ZONA

La preocupación por la salud ambiental de nuestra población se ha incrementado de manera exponencial en las instituciones del Estado Peruano y eso se ve reflejado en la actualización de las leyes ambientales y la creación de otras nuevas, todas dirigidas a mejorar la situación presente, que debido a las actividades industriales de décadas pasadas que actuaban sin ningún control dejaron pasivos ambientales que nos perjudican. La contaminación por partículas suspendidas no es un tema nuevo a nivel mundial pero si a nivel nacional, el común del pueblo peruano todavía no toma conciencia acerca de este peligro y asocia sus enfermedades a otros motivos y no lo relacionan al PM₁₀, que también es generador de estos malestares.

Las actividades de monitoreo ambiental nos ayudan a generar, analizar, sistematizar y difundir la información que necesitamos para conocer como se encuentra nuestra condición ambiental local e identificar las actividades, de origen humano que lo han generado pues, la naturaleza también nos puede afectar.

En tal sentido, se tiene diversas entidades del sector público y privado quienes realizan actividades vinculadas al proceso de monitoreo ambiental en el ámbito de la cuenca atmosférica de pisco.

1.4.1. Dirección General de Capitanías y Guardacostas (DICAPI)

En 1969 el Decreto Ley 17824 crea el Cuerpo de Capitanías y Guardacostas como organismo auxiliar de la Marina de Guerra, bajo responsabilidad del Director General de Capitanías y Guardacostas, para ejercer funciones de policía marítima, fluvial, lacustre y pesquera; control y protección de los recursos y riquezas naturales y, en general, control y vigilancia de toda actividad que se desarrolle en el ámbito acuático.

El 7 de junio de 1996 se promulga la Ley 26620, Ley de Control y Vigilancia de la Actividades Marítimas, Fluviales y Lacustres, por la cual se le otorga a la Dirección General de Capitanías y Guardacostas la condición de Autoridad Marítima Nacional, respecto de las actividades que se desarrollan en los ámbitos marítimo, fluvial y lacustre del territorio de la República, y considera dentro de su ámbito de aplicación, el mar adyacente a sus costas hasta la distancia de DOSCIENTAS (200) Millas Marinas, los terrenos ribereños en la costa hasta los CINCUENTA (50) metros, medidos a partir de la más alta marea, y los artefactos, na vales e instalaciones situadas en dicha zona; Con Decreto Supremo N° 028-DE/MGP de fecha 25 de mayo del 2001, se aprueba el Reglamento de la Ley N° 26620, Ley de Control y Vigilancia de las Actividades Marítimas, Fluviales y Lacustres, donde el artículo F-010102 , establece que corresponde a la Autoridad Marítima dentro del ámbito de su competencia y en coordinación con los sectores competentes, cuando corresponda, vigilar y hacer cumplir las normas relativas a la protección y preservación del ambiente en el medio acuático y franja ribereña de conformidad con la legislación vigente así como los convenios internacionales ratificados por el Estado Peruano.

Misión

Velar permanentemente por el control y seguridad de la vida humana, controlar el tráfico acuático, ejercer control y vigilancia para prevenir y combatir los efectos de la contaminación en el mar, ríos y lagos navegables, proveniente de cualquier fuente siempre que la actividad infractora se desarrolle en el ámbito de la Autoridad Marítima.

1.4.2. Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA)

Creado por Decreto Ley N° 25902 el 27 de noviembre de 1992.

Misión:

El INRENA es la autoridad pública encargada de realizar y promover las acciones necesarias para el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales renovables, la conservación de la diversidad biológica silvestre y la protección del medio ambiente rural, mediante un enfoque de ordenamiento territorial por cuencas y su gestión integrada; estableciendo alianzas estratégicas con el conjunto de actores sociales y económicos involucrados.

El Instituto Nacional de Recursos Naturales es el Organismo encargado de promover el uso racional y la conservación de los recursos naturales con la activa participación del Sector Privado. Asimismo, podrá realizar estudios de preinversión en las áreas de pequeñas obras de irrigación mejoramiento de infraestructura de riego y drenaje, recuperación de tierras afectadas por problemas de salinidad y drenaje, aprovechamiento de aguas subterráneas y de aguas servidas tratadas.

1.4.3. Instituto del Mar del Perú (IMARPE)

El Instituto del Mar del Perú - IMARPE fue creado por Decreto Legislativo N° 095 del 26 de mayo de 1981, es una persona jurídica de derecho público interno, que forma parte del sector Público Nacional, dependiendo sectorialmente del Ministerio de la Producción, Vice Ministerio de Pesquería, tiene como finalidad realizar investigaciones científicas y tecnológicas del mar y de las aguas continentales y de los recursos de ambos, con el objetivo de lograr el uso racional aprovechamiento de los mismos.

Misión

Estudiar el ambiente y la bio-diversidad marina, evaluar los recursos pesqueros y proporciona información y asesoramiento para la toma de decisiones sobre la pesca, la acuicultura y la protección del medio marino. Así mismo proporciona al Ministerio de la Producción, las bases científicas para la administración racional de los recursos del mar y de las aguas continentales.

Funciones Generales

Son funciones del IMARPE las siguientes:

- Planificar, dirigir, coordinar, ejecutar y evaluar las investigaciones de su competencia.
- Realizar investigaciones científicas de los recursos del mar y de las aguas continentales, los factores ecológicos de interacción y las que propendan al desarrollo de la acuicultura.
- Realizar investigaciones oceanográficas, limnológicas y de la calidad del ambiente acuático.
- Realizar investigaciones tecnológicas de extracción y detección.
- Proporcionar al Ministerio de la Producción las bases científicas para la administración racional de los recursos del mar y de las aguas continentales.
- Promover el desarrollo de la investigación científica y tecnológica, así como la formación, perfeccionamiento y especialización de los investigadores científicos y técnicos.
- Participar con otros organismos públicos en la formulación de las políticas científicas y tecnológicas.
- Coordinar con las universidades, empresas y otras personas naturales o jurídicas, las investigaciones de mutuo interés.
- Difundir los resultados de sus estudios e investigaciones a la comunidad científica y público en general.
- Priorizar las investigaciones que correspondan en concordancia con sus fines.

1.4.4. Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA)

Antecedentes

La Dirección General de Salud Ambiental, DIGESA es un Órgano de Línea del Ministerio de Salud, encargada del Saneamiento Básico, la Salud Ocupacional, Higiene Alimentaria, Zoonosis y Protección del Ambiente, según Decreto Legislativo N° 584-capítulo VIII – artículo 024, del 18 de Abril de 1990.

Función principal

La Dirección General de Salud Ambiental, **DIGESA**, está encargada de normar, supervisar, controlar, evaluar y concertar con los gobiernos locales y demás componentes del Sistema Nacional de Salud, así como con otros

sectores los aspectos de Protección del ambiente, Saneamiento Básico, Higiene Alimentaria, Control de Zoonosis y Salud Ocupacional.

1.4.5. Dirección Nacional de Medio Ambiente – DINAMA – Viceministerio de Pesquería

La Dirección General de Medio Ambiente es el órgano técnico normativo encargado de proponer a la Alta Dirección los lineamientos de política para que el desarrollo de la actividad pesquera guarde armonía con la conservación del medio ambiente y con criterio de sostenibilidad y preservación de los Recursos Naturales. Está a cargo de un Director Nacional que depende del Vice-Ministro de Pesquería.

Funciones:

- Formular y proponer a la Alta Dirección, las políticas y estrategias para que el desarrollo de la actividad pesquera guarde armonía con el medio ambiente;
- Proponer y supervisar normas y medidas de control para evitar el daño ambiental, así como velar por su cumplimiento;
- Promover, coordinar y supervisar estudios en materia ambiental, así como el uso de tecnologías limpias;
- Expedir resoluciones directorales en asuntos de su competencia;
- Administrar el registro y archivo de las resoluciones que expida;
- Atención de los Protocolos y convenios internacionales vinculados al tema ambiental.

1.4.6. Ministerio de Energía y Minas

El Ministerio de Energía y Minas, es el organismo central y rector del Sector Energía y Minas, y forma parte integrante del Poder Ejecutivo. El Ministerio de Energía y Minas tiene como finalidad formular y evaluar, en armonía con la política general y los planes del Gobierno, las políticas de alcance nacional en materia del desarrollo sostenible de las actividades minero – energéticas. Así mismo, es la autoridad competente en los asuntos ambientales referidos a las actividades minero - energéticas.

Misión: Promover la inversión privada en las actividades minero - energéticas en un marco legal competitivo, dentro de un desarrollo

sostenible e incentivando la investigación y la capacitación; contribuyendo asimismo a la preservación del ambiente, a lograr una industria segura, a relaciones armoniosas entre los actores y al desarrollo energético con criterio de subsidiaridad.

Objetivos

- Promover la inversión privada en el sub sector energía garantizando la satisfacción de la demanda e incentivando la diversificación, la explotación y el uso racional y eficiente de los recursos energéticos a precios competitivos y de buena calidad. Asimismo, fomentando el desarrollo de las actividades de hidrocarburos, a fin de revertir la balanza comercial existente.
- Promover la inversión privada en el sub sector minero mediante un marco legal competitivo, garantizando la estabilidad jurídica y velando por la seguridad y la preservación del ambiente, así como fomentando la racional explotación y la introducción de tecnologías limpias en la Pequeña Minería
- Mejorar la imagen de la actividad minero-energética promoviendo la conciencia ambiental en las empresas mediante la implementación de programas de gestión para preservar el ambiente, promover las relaciones armoniosas entre las empresas del sector, los consumidores y la sociedad civil; y propiciar la eliminación de los pasivos ambientales originados por las actividades minero energético.
- Contar con un sector estatal pequeño, moderno, eficiente y descentralizado que permita el cumplimiento de su misión.

1.4.7. Organismo Supervisor de la Inversión en Energía (OSINERG)

El OSINERG se crea mediante Ley N° 26734 publicada el 31 de diciembre de 1996, como organismo público encargado de supervisar y fiscalizar el cumplimiento de las disposiciones legales y técnicas de las actividades que desarrollan las empresas en los subsectores de electricidad e hidrocarburos, así como el cumplimiento de las normas legales y técnicas referidas a la conservación y protección del medio ambiente. El OSINERG inicia efectivamente el ejercicio de sus funciones el 15 de octubre de 1997.

Misión: Supervisar el correcto abastecimiento de electricidad e hidrocarburos y regular eficientemente los servicios a su cargo, actuando con autonomía.

1.4.8. APROPISCO S.A.C.

Antecedentes:

El 04 de marzo de 1999, los empresarios productores de harina de pescado, se constituyeron en la empresa APROPISCO S.A.C. para la ejecución de proyectos tendientes a mitigar la contaminación en el área de su influencia, entre los que se encuentran la instalación del emisor submarino (12 Km) para la recolección y evacuación de líquidos residuales.

A inicio del año 2000 adquirieron una embarcación "APROPISCO" destinada exclusivamente para investigación y exploración del recurso "Anchoveta", permite conocer las condiciones del mar y proporciona a las empresas la información sobre la zona de pesca. Desde junio del año 2002 contrata servicios de laboratorios registrados ante el Ministerio de Producción – DINAMA para el monitoreo periódico y permanente de los efluentes y cuerpo marino receptor.

1.4.9. GESTA Zonal de Aire de Pisco

En junio del 2001 se aprobó mediante Decreto Supremo N° 074-2001-PCM el "Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad del Aire", que fija los valores de dichos estándares y define 13 zonas de atención prioritarias: Arequipa, Chiclayo, Chimbote, Cusco, Huancayo, Ilo, Iquitos, La Oroya, Lima-Callao, Pisco, Piura, Trujillo y Cerro de Pasco.

En cada una de estas ciudades se conformaron "Grupos de Estudio Técnico Ambiental" denominado GESTA Zonal, integrado por representantes de instituciones públicas y privadas de cada zona, con competencias o conocimientos sobre el tema de la calidad del aire, incluyendo ONGs, empresarios, sociedad civil, universidades, etc.; siendo su objetivo elaborar un Plan de Acción para el mejoramiento de la calidad del aire de su ciudad.

Integrantes: CONAM (secretario técnico), DIGESA, direcciones regionales sectoriales, municipio, empresas privadas

Actividad: genera y analiza información de monitoreo de la calidad del aire en ámbito urbano. Propondrá plan de descontaminación.

Lugares de muestreo: 4 estaciones fijas: 2 en Pisco, 1 en San Andrés y 1 en Túpac Amaru.

Periodo de muestreo: diciembre 2003

Principales parámetros monitoreados:

Aire: SO₂, NO₂, PTS, PM_{2.5}, Metales pesados en PTS: cobre, cromo, manganeso, hierro, zinc, cadmio.

1.4.10. Aceros Arequipa S.A.

Actividad: Genera, analiza y remite al Ministerio de la Producción, información sobre monitoreo de emisiones atmosféricas y calidad del aire como cuerpo receptor

Lugares de muestreo: 5 puntos para calidad del aire en el ámbito de la planta siderúrgica y 2 puntos en chimenea.

Frecuencia: trimestral, desde el año 2001

Principales parámetros monitoreados:

Aire: PM₁₀, PTS, hierro, HCT, CO, SO₂, H₂S, NO_x, plomo, arsénico, cromo, manganeso. A la fecha, con autorización del Ministerio de la Producción, no se viene monitoreando los 3 últimos parámetros debido a que los niveles reportados son bajos.

Protocolo de monitoreo:

- Calidad de aire: Protocolo de monitoreo de la calidad del aire de los Sub Sectores: Minería e Hidrocarburos del Ministerio de energía y Minas (RD 004-94-EM/DGAA)
- Emisiones: Protocolo de monitoreo de emisiones atmosféricas del MITINCI, hoy parte del PRODUCE (RD 026-2000-ITINCI/VM) y otras normas internacionales.

1.4.11. Funsur S. A.

Actividad: Genera, analiza y remite al Ministerio de Energía y Minas información sobre emisiones atmosféricas y calidad del aire

Lugares de muestreo: 5 puntos (3 en chimenea y 2 en ámbito circundante a la planta de fundición)

Frecuencia de muestreo: mensual, desde marzo 1977

Principales parámetros monitoreados:

Aire: PM₁₀, SO₂, plomo, arsénico.

Tabla 1.4. Entidades que monitorean parámetros ambientales en Pisco.

ENTIDAD	ASPECTO AMBIENTAL MONITOREADO	PARAMETROS MONITOREADOS	INICIO Y CARACTERISTICAS DEL MONITOREO
IMARPE	Calidad aguas marinas	Temperatura, oxígeno disuelto, pH, salinidad, Demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos totales, aceites y grasas, sulfuros de hidrógeno, fosfatos, silicatos, nitratos, nitritos, trazas de metales	Enero 2000, 6 puntos en bahía Paracas, frecuencia mensual
	Sedimentos marinos	Materia orgánica, granulometría, trazas de metales	
	Organismos vivos marinos	Plancton (fitoplancton), macrozoobentos, trazas de metales	
	Calidad de agua del río Pisco	Temperatura, pH, fosfatos, silicatos, nitratos, nitritos, SST, oxígeno disuelto DBO Coliformes totales y termotolerantes.	Febrero 2003, 13 estaciones
	Sedimentos del río Pisco	Trazas de metales (cadmio, plomo, cobre y cinc)	Febrero 2003 2 estaciones
PLUSPETROL	Calidad aguas marinas	Temperatura, pH, salinidad, oxígeno disuelto, DBO5, sólidos suspendidos, nutrientes, aceites y grasas, hidrocarburos, amonio, fenoles	Setiembre 2003, 29 puntos para alerta temprana (frecuencia diaria), 22 puntos para línea base (frecuencia mensual)
	Sedimentos marinos	Sulfuros, bario, cadmio, cromo, plomo, mercurio	
DIGESA	Calidad aguas río Pisco	Metales pesados, Cd, Cu, Cr, Zn, Pb, Fe, Mn, pH, DBO, DO, Conductividad, Coliformes Totales y Coliformes termotolerantes.	Desde 1999, tres (3) puntos en el río Pisco cada (4) meses.
	Calidad de playas	Coliformes Totales y Coliformes termotolerantes, Coliformes fecales.	Enero 2003, frecuencia semanal, 6 playas
	Sanidad de moluscos	Coliformes totales, Coliformes termotolerantes, salmonellas, E-coli, hepatitis A, metales pesados, biotoxina paralizante (PSP), biotoxina diarreica (DSP), biotoxina amnésica (ASP).	Abril 2003, frecuencia quincenal, 30 puntos
APROPISCO	Calidad de efluentes pesqueros y cuerpo marino receptor	Oxígeno disuelto, DBO, SST, aceites y grasas, sólidos suspendidos totales	Junio 2002, 7 empresas, 10 veces al año
INRENA	Calidad de aguas río Pisco	Coliformes, temperatura, turbiedad, DBO, cianuro, dureza, OD, pH, fosfatos, nitrógeno amoniacal, arsénico, metales pesados)	Abril 2003, 2 puntos en río Pisco, frecuencia semestral
	Diversidad biológica	Censo de aves y lobos marinos (linos y chuscos)	Enero 2000, diversos puntos de la Reserva, frecuencia mensual
GESTA DE AIRE	Calidad del aire	SO2, NO2, PTS, PM2.5, Metales pesados en PTS: cobre, cromo, manganeso, hierro, zinc, cadmio	Diciembre 2003, un solo monitoreo en 4 puntos urbanos (Pisco, San Andrés, Tupac Amaru, Pisco)
ACEROS AREQUIPA	Calidad de emisiones atmosféricas y medio atmosférico receptor	PM10, PTS, hierro, HCT, CO, SO2, H2S, Nox, plomo, arsénico, cromo, manganeso	Febrero 2002, 5 puntos cerca de planta, 2 en chunenea, frecuencia trimestral
FUNDICION DEL SUR	Calidad de emisiones atmosféricas y medio atmosférico receptor	PM10, SO2, plomo, arsénico	Marzo 1977, 2 puntos cerca de planta, 3 en chimenea, frecuencia trimestral
EMAPISCO	Calidad de efluentes domésticos e industriales no pesqueros	Caudal, pH, temperatura, conductividad, DBO5, TDS, OD, coliformes totales y fecales	Junio 2001, frecuencia mensual en efluentes domésticos de planta tratamiento, frecuencia anual en efluentes industriales.
HUAYUNA	Calidad física del agua	Transparencia, oxígeno disuelto, temperatura, número de larvas	

1.5. ESTUDIOS INTERNACIONALES

A nivel mundial, diversos estudios nos muestran que las partículas respirables generadas por las actividades económicas humanas, junto con el desinterés de la población y las autoridades, afectan la salud en las poblaciones; el cambio para lograr un ambiente sano y sostenible debemos tomarlo de aquellos quienes tienen más experiencia, como parte de nuestros antecedentes e investigación presentamos diversos estudios que se llevaron a cabo sobre partículas PM_{10} o menores.

1.5.1. $PM_{2.5}$ Induce Alteraciones Cardiacas en Ratas Sanas

Hay evidencia de que los cambios del control autonómico del corazón están entre los mecanismos potenciales responsables de mortalidad relacionada a contaminación cardíaca. El objetivo de este trabajo es de evaluar los efectos agudos de material particulado urbano $PM_{2.5}$, ritmo cardiaco (RC) y su variabilidad. Cuarenta y siete (47) ratas sanas Wistar eran anestesiadas, sometidas a intubación traqueal y se les inocularon con 1ml de cuatro soluciones diferentes: Salina, filtro en blanco, y 50 o 100 mg de $PM_{2.5}$. El $PM_{2.5}$ fue recogido en filtro de fibra de cristal de muestreadores de alto volumen.

Los electrodos para obtener electrocardiogramas fueron implantados subcutáneamente en configuración Lead II. RC y la desviación estándar de los intervalos entre latidos normales (DEILN) fueron evaluados inmediatamente antes de 30 y 60 minutos después de la instilación. RC disminuyó considerablemente ($P < 0.001$) con tiempo, pero ningún efecto significativo de tratamiento o la interacción entre el tiempo y el tratamiento fue observado. Al contrario había una interacción significativa DEILN entre el tiempo y tratamiento ($P = 0.025$). La DEILN disminuyó 60 min. Después de la instilación con un $PM_{2.5}$ de 50 y 100 mg. Para concluir la inyección de una suspensión acuosa de $PM_{2.5}$ indujo una reducción de DEILN en ratas sanas. El efecto fue observado 1 h después de la instilación y en una concentración de $< 100 \mu\text{g}$. (Rodriguez, Sasaki y Lorenzi, 2005).

La conclusión del trabajo demostró evidencia de alteraciones cardiacas al inocularse soluciones salinas conteniendo PM_{10} .

1.5.2. Las Características de los Perfiles Verticales y Fuentes de PM_{2.5}, PM₁₀ y Especies Carbonosas en Beijing

En agosto de 2003, durante los Juegos Olímpicos de Verano de Beijing, fueron recogidas simultáneamente muestras de PM₁₀ y PM_{2.5} a 8, 100, 200 y 325m de una torre meteorológica en un sitio urbano y otro suburbano de Beijing. Las muestras fueron analizadas para conocer el contenido de carbón orgánico (OC) y el carbón elemental (CE).

El material particulado y la contaminación de especie carbonosa en la región de Beijing estaban seriamente extendidos en el 86 % de muestras de PM_{2.5} y estos excedían el Estándar de Calidad del Aire Diario Nacional Ambiental de EE. UU (65 μgm^{-3}) y el promedio total diario PM₁₀ las concentraciones de los tres sitios superficiales que exceden la Clase II Estándar de Calidad del aire Nacional de China (150 mgm^{-3}). El máximo diariamente(a diario) PM_{2.5} y concentraciones PM₁₀ alcanzó 178.7 y 368.1 mgm^{-3} , respectivamente, mientras aquellos de OC y CE alcanzaron 22.2 y 9.1 mgm^{-3} en PM_{2.5} y 30.0 y 13.0 mgm^{-3} en PM₁₀, respectivamente. De la tarde, sobre todo PM_{2.5}, OC y CE mostró distribuciones complejas verticales y estructuras distintas acodadas encima de la torre meteorológica con niveles elevados que se extienden a los 100, 200 y 300m alturas. Pruebas meteorológicas sugirieron que allí existan capas finas atmosféricas sobre Beijing urbano. Estas capas fueron destacadas por inversiones fuertes de temperaturas cerca de la superficie (50 m) y condiciones más estables en lo alto. Ellos realzaron la acumulación de agentes contaminadores y probablemente causaron las distribuciones complejas verticales de especie de la tarde y carbonosa sobre Beijing urbano. El con alza de la tarde fue acompañado por el transporte de emisiones industriales de la dirección sudoeste de la ciudad. Las emisiones del tráfico de carretera y actividades de construcción así como el carbón secundario orgánico (SOC) son las fuentes importantes de la tarde.

Se tiene como conclusiones finales que: altas proporciones OC/EC (la gama de 1.8-5.1 para PM_{2.5} y 2.0-4.3 para PM₁₀) fueron encontradas, sobre todo en los niveles más altos de la torre meteorológica que sugiere había producciones sustanciales de SOC en el verano Beijing. SOC, como se estima, considera para al menos el 33.8 % y el 28.1 % de OC en PM_{2.5} Y

PM₁₀, respectivamente, con porcentajes más altos en los niveles más altos de la torre. (Universidad Politécnica de Hong Kong, 2005).

1.5.3. Variaciones Temporales y Distribución Espacial de PM_{2,2} Ambiental y Concentraciones PM₁₀ en Dhaka, Bangladesh

En esta investigación las concentraciones y las características de PM aerotransportado (PM₁₀, PM_{2,2} y hollín) sobre la calidad del aire han sido estudiadas en dos estaciones de supervisión de calidad de aire en Dhaka, la capital de Bangladesh. Un sitio está en el área de Puerta de Granja, un punto caliente con muy altas concentraciones de agente contaminador debido a su proximidad con autopistas. Otro sitio está en un área semi residencial localizada en el Centro de Energía Nuclear, Dhaka Campus, (CENDC) con relativamente menos tráfico. Las muestras fueron recogidas usando un 'Gent' la unidad con filtro en dos tamaños de: 0 - 2.2 µm y 2.2 - 10µm. Las muestras más finas (PM_{2,2}) y fracciones mas gruesas (PM_{2,2-10}) a partir de 2000 hasta 2003 fueron estudiadas. Ha sido observado que las muestras mas finas de PM tienen una tendencia que disminuye, en comparación con medidas de años anteriores, debido a intervención del Gobierno en política de medio ambiente como proyectos inteligentes en fases para disminuir los vehículos con motores de dos o tres golpes de los caminos en Dhaka y finalmente prohibirlos a partir del 1 de enero de 2003. Otras intervenciones de política prohibían la circulación de viejos autobuses y camiones en la ciudad Dhaka y promocionando a su vez la utilización el gas natural comprimido (GNC), e introduciendo dispositivos de control de contaminación del aire en vehículos, etc. Fue encontrado que ambos a nivel local (sobre todo de emisiones automóbiles) y posiblemente algunas fuentes de emisión regionales son responsables de las altas concentraciones de PM_{2,2} y hollín en Dhaka. PM_{2,2}, PM_{2,2-10} y niveles de concentración de hollín dependen de la estación del año, la dirección y velocidad de viento. El transporte se relacionó como la fuente principal y con mas largo alcance de emisiones de hollín, comparado con las otras fuentes de combustible fósil relacionadas, además la quema de biomasa podría ser otra fuente sustancial de hollín. (Chemistry Division Atomic Energy Centre, 2005).

Por lo tanto para este estudio concluimos en que la efectiva participación del Gobierno en política ambiental al disminuir el tránsito de vehículos antiguos favoreció en la disminución de la concentración de PM dañino.

1.5.4. Caracterización Química de Partículas Individuales (PM₁₀) de Aire Ambiental en Ciudad Guiyang, China

Muestras de PM₁₀ fueron recogidos durante 5 días en Guiyang, China en julio de 2003. Un total de aproximadamente 2300 partículas fueron analizados por un Microscopio de Electrones Automatizado que Explora con el Espectrómetro Dispersivo de Energía (MEAEDE). El Análisis de Clusters Jerárquico (ACJ) fue usado identificar los diferentes tipos de partículas que se encontraron en el aerosol. Diecisiete tipos de partícula fueron identificados y presentados en orden decreciente de abundancia: escoria de silicomanganeso, suelo y ceniza de mosca, la quema de carbón, silicomanganeso, cuarzo, hierro, calcio rico, yeso, esfalerita, dolomita, sulfatos, partículas ricas en zinc, partículas ricas de azufre y aluminio proveniente de las fabricas que arrojan polvo. La mayoría de las partículas en la gama de tamaño estudiada es de origen antropogénico, sobre todo de la industria metalúrgica. El estudio ilustra la complejidad de contaminación de las partículas en el aire de una ciudad industrial china y los resultados deberían ser útiles en la planificación de medidas de mitigación. (Xiea, Seipa, Leinumb & Xiaod, 2004).

Se obtiene como resultado de este estudio que: no importa solamente la cantidad de PM que respiramos e inhalamos, debe tenerse en cuenta también que quimicos se encuentran asociados a estas partículas.

1.5.5. Una Red Neuronal de Pronóstico Diario para Concentraciones de PM₁₀ en Bélgica.

A lo largo de los años pasados, el impacto en la salud a causa de PM aerotransportado se ha hecho un tópico muy conocido. En las ciencias ambientales mucho esfuerzo de investigación se dirige al entendimiento del fenómeno y la capacidad de pronosticar las concentraciones ambientales. En este trabajo se describe el desarrollo de un instrumento de red para pronosticar la concentración diaria PM₁₀ en Bélgica con un día de anticipación. Esta investigación esta basada en medidas de diez sitios durante el período 1997-2001 y sobre las simulaciones de parámetros meteorológicos.

La variable de entrada mas importante encontrada era el la altura de capa divisoria. Un modelo basado en este parámetro actualmente operacional sirve para supervisar el umbral máximo diario de $100 \mu\text{gm}^{-3}$. Por extensión del modelo con otros parámetros de entrada fueron capaces de aumentar el funcionamiento sólo ligeramente. (Hooyberghs, Mensinka, Dumont, Fierensb, 2005).

Esto nos trae a la conclusión que: las fluctuaciones cotidianas de las concentraciones para PM_{10} en áreas belgas urbanas en gran parte se conducen por condiciones meteorológicas y a un menor número debido a fuentes antropogénicas.

1.5.6. Los Efectos de Polvo Asiático en Acontecimientos Diarios sobre Admisiones de Golpe en Taipei, Taiwán

Al igual que en el territorio peruano, como es el caso de los “Vientos Paracas”, los eventos naturales también afectan a las ciudades, la presente investigación realizada en Taiwán nos dará una idea de cómo puede estar afectando en nuestras ciudades estos acontecimientos.

En tormentas de polvo de primavera, arrastradas por el viento que provienen de Mongolia y China se dirigen a la ciudad Taipei. Estos eventos se conocen como la tormenta de polvo asiática. El objetivo de este estudio era de evaluar las asociaciones posibles entre las admisiones en el hospital y estas tormentas de polvo asiático en los residentes de Taipei, Taiwán. Durante el período desde 1996 hasta 2001 identificaron 54 tormentas de polvo o episodios, que fueron clasificados como días índices. Diariamente las admisiones en el hospital que ocurrieron en los días índices, fueron comparadas con admisiones en días de comparación. Seleccionaron dos días de comparación durante cada día de índice, 7 días antes de los días de índice y 7 días después de los días de índice.

Los resultados del estudio indicaron una asociación estadísticamente significativa entre acontecimientos de tormenta de polvo asiática y admisiones al hospital por hemorragia intracerebral 3 días después del acontecimiento (riesgo relativo de 1.15; el 95 % CI, 1.01-10.10). Esto estuvo previsto principalmente para PM_{10} . Concluyeron que más atención ser dada

a tormentas de polvo asiática y la salud en el futuro. (Chun, Young, Hui & Gogginsd, 2004).

Al estudiar este caso nos dimos cuenta que haciendo una relación con los eventos de vientos paracas que afectan Pisco, puede verse afectada seriamente la salud de la población de Pisco.

1.5.7. PM₁₀ Pronosticando para Thessaloniki, Grecia

La investigación presente apunta al desarrollo de un módulo eficiente y confiable, para los niveles de concentración PM₁₀ para la ciudad de Thessalonika. El área Thessalonika es urbana muy densamente construida, con un grado alto de motorización y concentración de actividades industriales. El aumento de emisiones principalmente del tráfico y la industria son responsables del aumento de niveles de contaminación atmosféricos durante los últimos años. El set de datos de calidad de aire examinados en este estudio fueron recogidos por una red de estaciones que monitorean el aire y es manejada por el municipio de Thessalonika y corresponde a concentraciones PM₁₀ durante los años 1994-2000. Para proveer un módulo que pronostique la calidad de aire para PM₁₀, diferentes métodos estadísticos fueron investigados y aplicados. Los resultados presentados demostraron que el CART (Classification And Regression Trees) y la Neural Network (NN) fueron métodos capaces de capturar tendencias de concentración PM₁₀, mientras el CART puede tener un mejor funcionamiento acerca del índice de concentración. Métodos estudiados (incluyendo regresión lineal y análisis de componentes principales) demostraron capacidades de pronóstico prometedoras. (Slini, Kaprara & Moussiopoulos, 2004).

En conclusión: muchas ciudades ya existen los sistemas para detección y pronóstico de concentraciones PM₁₀ basados en modelos matemáticos muy efectivos como lo demuestra este estudio, la ciudad de Lima sería un punto de partida.

1.5.8. Niveles y Mutagenicidad de Partículas Aerotransportadas PM₁₀ y PM_{2.5} en Chiang Mai, Tailandia

Diariamente los niveles de material particulado en el aire ambiental (PM_{2.5} y PM₁₀) fueron medidos en Chiang Mai, una ciudad del norte de Tailandia,

desde marzo de 1998 hasta octubre de 1999. Cada día fueron recogidas muestras de veinticuatro horas de aire con un minivol portátil Airmetric Minivol. Mensualmente los promedios de $PM_{2.5}$ de cuatro estaciones en Chiang Mai variaron de 15.39 a 138.31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 27.29 a 173.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} . El $PM_{2.5}$ promedio anual era 58.48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y PM_{10} , 86.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Diariamente $PM_{2.5}$ (valores de 24h) durante los meses de invierno en Chiang Mai con frecuencia excedían 200-300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones máximas de $PM_{2.5}$ (valores de 24h) en el aire de Chiang Mai desde diciembre de 1998 hasta abril de 1999 eran 2.8-, 3.5-, 4.2-, 6.5- y 3.2- pliegue más alto que los de la Agencia de protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA, $PM_{2.5}$, 24 de h de 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Desde mayo hasta octubre, los niveles de 24h para $PM_{2.5}$ y PM_{10} estaban en niveles aceptables. Los datos muestran que durante el la estación de invierno (diciembre hasta marzo), los niveles de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en la ciudad de Chiang Mai estaban muy altos, y allí pueden haber implicaciones de salud significativas asociadas con estas concentraciones altas. Durante la estación de verano, los niveles de concentración de las partículas finas estaban generalmente dentro de los niveles aceptables. Según lo que se conoce, estas son las primeras muestras tomadas de $PM_{2.5}$ que se reportaron en la ciudad de Chiang Mai y ellas indican exposiciones de partículas finas considerablemente altas para la población de Chiang Mai. En adición, fueron encontrados extractos de diclorometano en las muestras de $PM_{2.5}$ y PM_{10} recolectadas en los meses de invierno en la ciudad de Chiang Mai y era mutagénico a la *Salmonella typhimurium* que filtran TA100 sin la activación metabólica. La mutagenicidad apareció para rastrear concentraciones de partículas y aumento en la presencia de mezcla de S9. (Vinitketkumnuen, Kalayanamitra, Chewonarin & Kamensa, 2002).

Este estudio nos demuestra que las partículas de PM_{10} pueden sufrir contaminación al momento de ser aerotransportadas y posteriormente afectar la salud de la población, Pisco no es la excepción.

1.5.9. Evaluación de Funcionamiento del Minivol Portátil para Evaluación de PM_{10}

El equipamiento utilizado en nuestra toma de muestras durante nuestra investigación, como lo demuestra el siguiente artículo, es utilizado para diversos estudios.

El MiniVOL es una opción popular para el empleo en evaluaciones de calidad de aire porque este es portátil y barato en relación con monitores de sitio fijos y los HighVol. Sin embargo, pocos datos existen sobre las características de funcionamiento del MiniVOL. La fiabilidad, la precisión, y la comparabilidad del MiniVOL portátil PM_{10} y $PM_{2.5}$ en condiciones típicas ambientales se describen en este documento. Los resultados indican que el MiniVOL manejado por fuentes fidedignas obtiene medidas de concentración estadísticamente similares cuando se co-localiza con otro MiniVOL ($r^2=0.96$ para medidas PM_{10} y $r^2=0.95$ para medidas $PM_{2.5}$). Así, la caracterización de las distribuciones espaciales de concentraciones de masas para PM_{10} y $PM_{2.5}$ con el MiniVOL puede ser logrado con un nivel alto de confianza. El MiniVOL también produjo resultados estadísticamente comparables cuando fue co-localizado con un muestreador Dichotomous ($r^2=0.83$ para PM_{10} y $r^2=0.85$ para medidas $PM_{2.5}$) y un sistema muestreador de masa continuo ($r^2=0.90$ para medidas PM_{10}). Factores ambientales como la concentración ambiental, la velocidad de viento, la temperatura, y la humedad pueden influir en la comparabilidad de medida relativa entre estos sistemas de muestreo. (Baldaufa, Laena, Marotza & Wienerb, 2001).

Nuestro estudio se basó en muestras tomadas con MiniVol que también es usado en diferentes estudios, por tanto el HighVol no es la única manera de tener estudios refrendados adecuadamente.

1.5.10. Determinación de la Fuente PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el Área Metropolitana de Barcelona, Cataluña, España

Los niveles de partículas totales suspendidas, PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1 continuamente fueron supervisados el área metropolitana de Barcelona desde junio de 1999 hasta junio de 2000. La proporción $PM_{2.5}/PM_{10}$ es dependiente de las emisiones de tráfico, mientras que fuentes de contribución adicionales para la fracción $>10\mu m$ deben ser tenidas en cuenta en el periodo diurno. Diferentes técnicas de prorrateo para PM_{10} y $PM_{2.5}$ de la fuente fueron comparadas. Una metodología basada en la determinación química del 83 % de PM_{10} y $PM_{2.5}$ nos permitió cuantificar al marino (el 4 % en PM_{10} y el 1% en $PM_{2.5}$), cristal (el 26 % en PM_{10} y el 8 % en $PM_{2.5}$) y antropogénico (el 54 % en PM_{10} y el 73 % en $PM_{2.5}$). Los picos

de contribución crustal a PM_{10} (hasta el 44 % de la masa de PM_{10}) fueron registrados bajo intrusiones de masa de aire Sahara. Una tendencia estacional diferente fue observada para los niveles de sulfato y el nitrato, probablemente como una consecuencia del diferente comportamiento termodinámico de estos de la tarde especie y la tarifa de oxidación más alta de verano de SO_2 . (Querol, Alastuev, Rodriguez & Ruiz, 2001).

La conclusión a que llega este estudio y colabora con el nuestro es que cada hora los niveles de $PM_{2.5}$ y PM_1 son compatibles con el ciclo diario de agentes contaminadores gaseosos emitidos por el tráfico, mientras que PTS y PM_{10} no siguen la misma tendencia, al menos en el periodo diurno.

1.5.11. Los Niveles de Material Particulado en Sitios Rurales, Urbanos e Industriales en España

Este documento resume los resultados de una serie de estudios sobre la interpretación de serie de tiempo de los niveles de total partículas suspendidas (TSP) y PM ($PM < 10 \mu m$) en seis regiones de España en el periodo 1996-2000. Además de los acontecimientos de contaminación locales, episodios altos de PM_{10} son registrados durante brotes de polvo africanos, acontecimientos de recirculación regionales atmosféricos (principalmente en la primavera a otoño), y a un grado menor, bajo la influencia de las masas de aire transportadas de Europa y Mediterráneo. El más bajo PM_{10} niveles por lo general son registrados durante las condiciones de masa de aire advectivo del Atlántico.

Todos estos procesos regionales de gran escala fueron los que aumentaron los niveles de PM_{10} registrados con estaciones regionales en España. Así, los niveles de PM_{10} registrados en EMEP (Cooperative Program for Monitoring and Evaluation of the Long Range Transmission of Air Pollutants in Europe) en las estaciones de fondo entre marzo 2001 y marzo 2002 están muy cerca del valor de límite anual propuesto hacia 2010 por la EU Air Quality Directive 1999/30/CE de la Unión Europea. Datos químicos obtenidos para las diferentes estaciones de supervisión durante 2001 muestran una carga alta mineral en PM_{10} para la mayor parte de las estaciones ubicadas en España. Además, una carga alta de aerosol marítimo es evidenciada en Islas Canarias. Este mineral y cargas marítimas son inferiores considerando $PM_{2.5}$, pero una proporción relativamente alta

(el 8-21 %) de polvo mineral está todavía presente. (Querol, Alstuev, Viana & Artiñamo 2004).

1.5.12. Mediciones de PM₁₀ en Estación McMurdo, Antártida

En la Estación McMurdo de la Antártida, fueron monitoreados aerosoles PM₁₀ durante los veranos australes 1995 - 1996 y 1996 - 1997. PM₁₀ (partículas con diámetros aerodinámicos menos de 10 µm) concentraciones de masas en el punto de medición, fueron localizadas a menos de 1 kilómetro del centro McMurdo, con una concentración promedio de 3.4 µm⁻³, más de una orden de magnitud más abajo que el estándar de calidad de aire USEPA y del anual medio Nacional Ambiental (NAAQS) de 50 µm⁻³. Las concentraciones de metasulfonato y el nitrato estaban similares a aquellos moderados en otros sitios Antárticos costeros.

Las concentraciones de el sulfato de no-sal marina (SNS) sobre Ross Island estaba más alto que aquellos encontrados en otras posiciones costeras. El promedio de la concentración elemental de carbón (129 µm⁻³) de sotavento de la estación era dos órdenes de magnitud más alto que aquellos tomados en la región antártica remota costera e interior monitoreadas durante el verano. El promedio de concentraciones de dióxido de azufre (746 µm⁻³) era de 3 a 44 veces más alto que aquellos mencionados para la Antártida costera. Las concentraciones de Pb y Zn eran 17 y 46 veces más alto que aquellos relatados para el Polo Sur. (Mazzera, Lowenthal, Chow, Watson & Grubisic, 2000).

Podemos rescatar de este estudio que la contaminación de partículas respirables es también observada en ambientes naturales que han sido influenciados por la presencia del ser humano, con mucho más razón pues en nuestras ciudades, nuevamente Pisco debe ser considerada por su cercanía y presencia de zonas áridas.

1.5.13. PM₁₀ y el Humo Negro Estudiado en un Pequeño Pueblo de República Checa

Concentraciones de veinticuatro horas de PM₁₀ y humo negro fueron medidos durante dos inviernos y un verano en un pequeño pueblo en la parte central de la República Checa. Tanto el PM₁₀ como el humo negro fueron correlacionados durante las dos estaciones calientes (0.740 en el

primero y 0.768 en la segunda campaña de invierno, respectivamente). La correlación que arrojó fue 0.567 durante el periodo de verano. Se detectó una correlación negativa entre humo negro de invierno y velocidad de viento (-0.543 y -0.486). Mostró una asociación cercana entre la contaminación del aire de la combustión y el movimiento de masa de aire bajo en el lugar durante estaciones de verano. Ninguna correlación entre el humo negro y la velocidad de viento fue encontrada durante el verano (0.057). Ambos PM_{10} y el humo negro fueron correlacionado negativamente con la temperatura mínima diaria durante ambas estaciones de invierno así como durante en la estación de verano.

La comparación de datos PM_{10} del pueblo con aquellos de Praga, la capital checa, mostró un promedio de concentraciones de material particulado más alto en el sitio rural durante todas las tres estaciones estudiadas. El límite recomendado para 24 horas de muestreo de PM_{10} en la Unión europea ($50 \mu m^{-3}$) fue excedido en el 26 % y el 33 % de días medidos en el pequeño pueblo mientras sólo en el 17 % y el 15 % de días moderados en Praga, durante el primer y segundo invierno respectivamente. Una buena asociación entre datos del pueblo con aquellos de Praga sugiere, por un lado, que algún efecto de transporte material particulado de la ciudad al sitio rural no puede ser excluido, pero, de otra parte, esto puede ser causado por las condiciones similares climáticas de los dos lugares.. (Braniz & Domasova, 2002).

En conclusión: los resultados del estudio apoyan la idea que la calefacción tradicional en pueblos puede representar un problema importante de contaminación del aire.

1.5.14. Caracterización Química de Episodios de PM al NE De España

La composición química del material particulado ambiental (PM) varía extensamente como función de sus principales fuentes de emisión y de las reacciones químicas que ocurren en la atmósfera. El objetivo de este estudio es obtener el perfil químico de PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante el pico de los episodios de PM, así se identificara las fuentes de emisión principales y/o los procesos atmosféricos que originan los episodios. En esta etapa, un análisis fue aplicado a una cantidad de datos de PM_{10} y otros de $PM_{2.5}$

monitoreados a lo largo del 2001 en dos áreas urbanas e industrializadas en el NE de España.

Como consecuencia de este análisis, cinco racimos fueron identificados para cada sitio, y la interpretación de sus perfiles químicos conduce a la identificación de cinco tipos de pico PM para cada sitio: industrial, tráfico y episodios de recirculación regionales en ambos sitios, más episodios PM en Barcelona, y pico máximo de tráfico y episodios industriales (T + I) en Tarragona. Los episodios son caracterizados por el promedio diario de 23 y 10 μm^{-3} de polvo orgánico con carbón elemental en Barcelona y PM_{10} en Tarragona. Los niveles de aerosoles secundarios inorgánicos hacen un promedio diario de 19 y 11 μm^{-3} en Barcelona y Tarragona durante episodios industriales de PM_{10} . Los niveles altos de sulfato ($> 5 \mu\text{m}^{-3}$) y el ozono (hasta 77 μm^{-3}) son buenos indicadores de episodios de recirculación regionales. Durante los episodios diarios significa que el material particulado aumenta hasta alcanzar los 34 μm^{-3} en Barcelona. Atención especial ha sido dada a la composición de material mineral durante los diferentes episodios. (Viana, Querol, Alastuey & Institute of Herat Science, 2005).

1.6. ESTUDIOS EN SUDAMERICA

1.6.1. Composición Elemental de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ en Ambiente Urbano en el Sur de Brasil

El objetivo del estudio presente es de analizar la composición elemental y las concentraciones de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ en la cuenca hidrográfica de Guaiba con muestreadores HV de PM_{10} . Tres sitios fueron seleccionados para el monitoreo: 8º Distrito, CEASA y Charqueadas. El monitoreo fue conducido desde octubre del 2001 hasta diciembre del 2002. La masa recolectada en los filtros fueron evaluadas, mientras las concentraciones elementales de Si, S, Cl, K, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu y Zn fueron determinados usando la técnica de emisión de partículas inducidas de rayos X (PIXE).

Análisis de Factor y análisis de Correlación Canónico fue aplicado a las variables químicas y meteorológicas para identificar las fuentes del material particulado. Actividades industriales como plantas de acero, centrales eléctricas que funcionan con carbón, quema de basura de hospital,

emisiones vehiculares y el suelo fueron identificados como las fuentes de material particulado. Los niveles de concentración fueron más altos que el de las normas de calidad de aire anuales medias (150 y 50 μm^{-3} respectivamente). (Braga, Texeira, Meira Wiegand & Dias, 2004).

Pisco tiene presencia de industrias del acero, los resultados de este trabajo en Brasil indican que la población de Pisco se puede ver afectada al estar en cercanía con este tipo de industria.

1.6.2. Los Efectos de Contaminación Atmosférica y Parámetros Meteorológicos sobre Morbilidad Respiratoria Durante el Verano en la Ciudad de São Paulo

Los efectos de variables meteorológicas y agentes contaminadores de aire sobre la morbilidad infantil respiratoria fueron investigados durante dos veranos consecutivos (Diciembre-Marzo 1992-1993 y 1993-1994) en el Área Metropolitana de Sao Paulo (AMSP), Brasil. El AMSP, con casi 17 millones de habitantes, es considerado la región más populosa en Sudamérica. Temperaturas debido al verano, la precipitación aumentó y consiguientemente bajaron los niveles de agentes contaminadores de aire durante el verano comparado al invierno, menos atención ha sido dada a estudios epidemiológicos durante esta estación, sobre todo en áreas tropicales urbanas como San Paulo.

En este trabajo, el análisis principal componente (APC) es aplicado al final, datos médicos y ambientales para identificar el modelo que relaciona morbilidad infantil, variables meteorológicas y agentes contaminadores de aire durante el verano. Las siguientes concentraciones de agente contaminador fueron examinadas: SO_2 , material particulado inhalable (PM_{10}), y O_3 . Las variables meteorológicas investigadas fueron: temperatura del aire, el vapor de agua (densidad de vapor de agua) y la radiación solar. Aunque una correlación baja entre morbilidad respiratoria, variables ambientales y contaminadores del aire fueron observadas en el estudio, el método APC indica que la morbilidad infantil es asociada positivamente con O_3 durante el verano 1992/1993. Este modelo es conocido como el tercer componente principal (PC3), que explica aproximadamente el 19 % de todos los datos en este verano. Sin embargo, el verano 1993/1994 muestra

una asociación más compleja entre ambos grupos, sugiere fuertes lazos con variables meteorológicas.

Cambios marcados de condiciones sinópticas del final de enero a final de marzo del 1993/1994 el verano parece haber jugado un papel importante en la modulación de la morbilidad respiratoria. Un examen detallado de condiciones meteorológicas en aquel período indica que pre-frontal (post-frontal), calor (frio) y días secos (húmedos) favorecieron la disminución (aumento) de la morbilidad respiratoria. (Goncalvez, Carvalho, Conde, La Torre & Saldiva, 2004).

Tendríamos que opinar respecto de este estudio realizado en Brasil que al ser Pisco una ciudad con poca precipitación de lluvias, la morbilidad a causa de enfermedades respiratorias estaría en aumento.

1.6.3. Promedios Geométricos de Material Particulado Fracción Respirable (PM₁₀) y Detección de Metales en el Aire de Bucaramanga - Colombia

El material particulado-fracción respirable (PM₁₀), es uno de los contaminantes más importantes en el aire y su estudio es de especial interés porque se inhala en el proceso de la respiración, pasando por el tracto respiratorio y depositándose en los alvéolos. El PM₁₀ contiene gran variedad de metales cuyo origen puede ser natural o antropogénico. En este trabajo muestra los promedios geométricos de material particulado-fracción respirable y la caracterización físico-química de los filtros de microquarzo, recolectados durante los años de 1997,1998 y en los meses de Enero-Abril de 1999, en cuatro estaciones de muestreo localizadas en diferentes sitios de la ciudad de Bucaramanga-Colombia. Los filtros fueron sometidos a una digestión ácida y los metales fueron medidos por espectrofotometría de absorción atómica.

Se dieron como resultados: Inicialmente se analizaron 11 metales que posiblemente se encontraban en el aire de la ciudad de Bucaramanga, debido a su actividad industrial y vehicular. De estos 11 metales, se detectaron Al, Ca, Fe, Mg,y Zn en todas las estaciones; en menor proporción se encontró Pb y algo de Ni y Cu en la estación de Kennedy no se detecto Cd, Cr ni V.. El análisis del contenido de metales de los filtros de

la fracción respirable, es fundamental para la prevención de enfermedades y la planificación urbana. (Quijano & Universidad Pamplona, 2000).

Se concluyó en que si bien las concentraciones diarias de PM_{10} no sobrepasan la norma Internacional, los promedios Geométricos están altos, lo que obliga a aumentar los controles a las fuentes emisoras de material particulado-fracción respirable.

1.6.4. Predicción de la Máxima Concentración de PM_{10} Promedio para las Próximas 24 de PM_{10} en Santiago-Chile

En este trabajo se ha desarrollado una red de monitoreo basado en los valores de concentraciones PM_{10} medidos hasta 6 de la tarde sobre el día presente más los valores medidos y pronosticados de variables meteorológicas, de esta forma se puede predecir el nivel que alcanzara el máximo de concentración PM_{10} sobre las 24 horas del día siguiente. Este estudio se ajustó a los parámetros del modelo que usa datos de 1998 para predecir condiciones de 1999 y datos de 1999 para pronosticar Concentraciones máximas en el 2000.

Encontró que entre las variables relevantes meteorológicas de entrada, la diferencia pronosticada entre la temperatura máxima y mínima es lo más importante. Debido al hecho que autoridades locales impongan restricciones a emisiones en días cuando esperan que el máximo de 24 de concentración PM_{10} pueda exceder 240 mg/m^3 , han corregido las concentraciones moderadas sobre estos días antes de la evaluación de la eficacia del pronóstico de modelo. Los errores en el pronóstico del valor numérico son del orden del 20 %.

El funcionamiento de la red es mejor que el de un modelo linear con las mismas entradas, pero la diferencia está en que la opción de escoger entre variables de entrada puede ser más importante que la decisión de usar un modelo linear o no linear (Patricio & Universidad de Santiago de Chile, 2002).

Deducimos para el caso nuestro que la temperatura es un factor muy importante para tener en cuenta al momento de monitorear e interpretar resultados.

1.6.5. Los Efectos en Salud de la Contaminación Atmosférica por PM₁₀ en Santiago

En este trabajo se presenta una metodología para estimar los impactos en salud que se pueden asociar a un programa que reduce las concentraciones de PM₁₀ en Santiago. Los menores efectos en salud valorados en términos monetarios, tanto en mortalidad como en morbilidad, representan los costos evitados por el programa y, por lo tanto, son una medida de sus beneficios en salud. La metodología se aplica a un programa que reduce las concentraciones de PM₁₀ en forma lineal hasta alcanzar la norma de calidad ambiental en un plazo de 20 años. Los resultados de este ejercicio de valoración sugieren que los beneficios son de una magnitud considerable y son crecientes en el tiempo.

Resultados: Para ilustrar los resultados obtenidos, en la fig. 1.5.B se muestra la evolución de los casos de mortalidad evitados con el cronograma de descontaminación en los tres niveles evaluados (véase fig. 1.5.A). Cabe hacer notar, que en el nivel alto, la mortalidad evitada empieza a incorporar gradualmente el efecto crónico incluido en el parámetro de la función dosis-respuesta de dicho nivel, con lo que se aleja progresivamente de las medidas media y baja.

Con respecto a la morbilidad, la fig. 1.5.C se muestra la evolución de los casos de admisiones hospitalarias por enfermedades respiratorias y cardiovasculares, y de bronquitis aguda, evitados con el PdD estudiado (nivel medio).

Figura 1.5.A. Cronograma de descontaminación de PM₁₀.

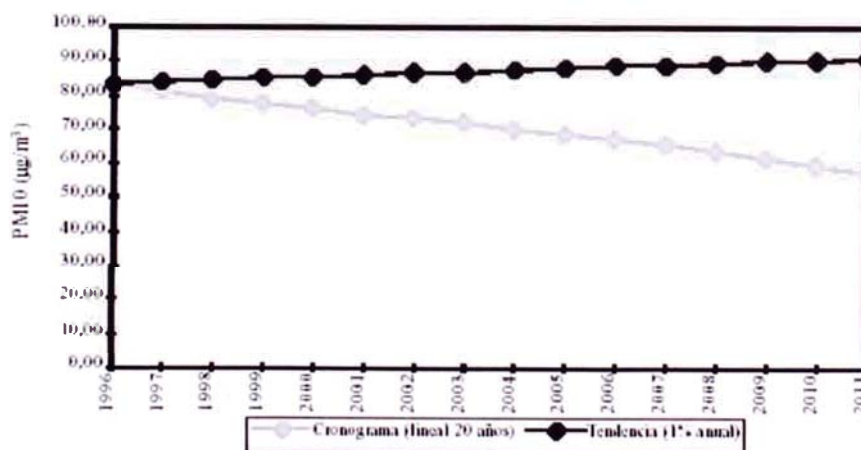


Figura 1.5.B. Mortalidad evitada con cronograma de descontaminación de PM₁₀.

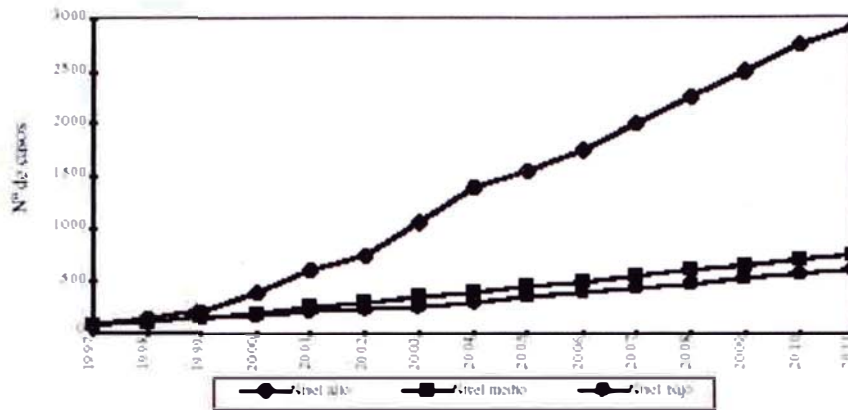
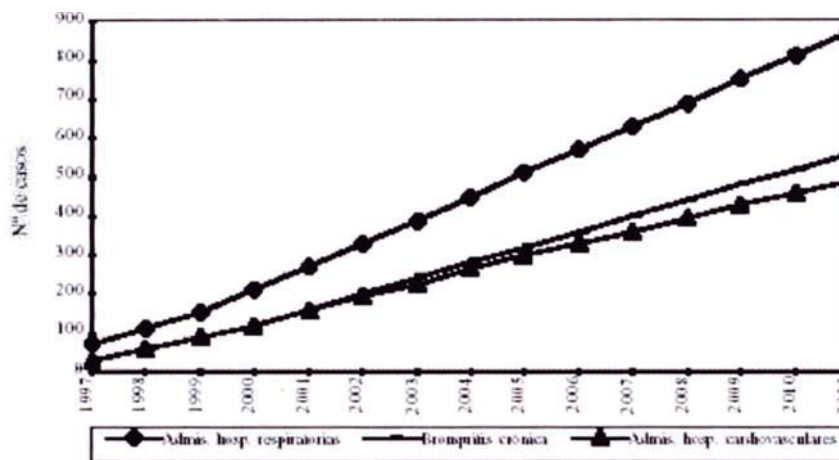


Figura 1.5.C. Morbilidad con cronograma de descontaminación de PM₁₀.



Finalmente, en e 1.6 se muestran los casos evitados en un año cualquiera, de mortalidad y morbilidad por la reducción de PM₁₀. Se reportan los resultados con los tres valores para las funciones dosis-respuesta (alto, medio y bajo).

Tabla 1.5. Valores Unitarios Utilizados en la Valoración Monetaria.

Efecto en salud	Costo unitario Eskeland (1994)	Costo unitario Canadá (1997)
Mortalidad	\$ 17,636,292	516,600,000
Morbilidad:		
Admisiones hospitalarias por enfermedades respiratorias	\$ 198,662	\$ 840,000
Admisiones hospitalarias por enfermedades cardiovasculares	\$ 198,662	\$ 1,075,200
Visitas a salas de emergencia	\$ 13,026	\$ 77,700
Días de actividad restringida	\$ 2,253	\$ 9,660
IRA baja en niños	\$ 75,455	\$ 46,620
Bronquitis crónica adultos	\$ 21,176,314	\$ 37,500,000
Días síntomas de asma	\$ 3,003	\$ 6,300
Días de actividad restringida menor	\$ 1,276	\$ 4,620
Días con síntomas respiratorios agudos	\$ 451	\$ 1,806

Tabla 1.6. Mortalidad y Morbilidad por contaminación por PM₁₀ evitada con cronograma 20 años lineal en un año seleccionado (Número de casos).

Efecto	Nivel	Año 2005
Mortalidad	Alto	1.604
	Medio	477
	Bajo	412
Admisiones hospitalarias por enfermedades respiratorias	Alto	578
	Medio	495
	Bajo	433
Admisiones hospitalarias por enfermedades cardiovasculares	Alto	369
	Medio	300
	Bajo	226
Visitas a salas de emergencia	Alto	2.794
	Medio	2.392
	Bajo	2.093
ASMA - Días con síntomas	Alto	1.035.764
	Medio	306.893
	Bajo	172.890
Días de actividad restringida (neto)	Alto	1.170.365
	Medio	1.128.693
	Bajo	655.471
Enfermedades respiratorias bajas en niños	Alto	49.424
	Medio	35.075
	Bajo	22.908
Síntomas respiratorios agudos	Alto	1.342.657
	Medio	882.318
	Bajo	421.978
Bronquitis crónica	Alto	489
	Medio	321
	Bajo	158

La tabla 1.7 presenta el valor actual total de los beneficios en salud producto de las reducciones de PM₁₀ en 20 años usando los dos conjuntos de parámetros de valoración.

Tabla 1.7. Beneficios totales en salud (mortalidad y morbilidad por contaminación por PM₁₀ evitada en 20 años.

Efecto	Nivel	Total (US\$, valores chilenos)	Total (US\$, valores de Canadá equivalentes)
TOTAL	Alto	498.375.948	8.315.978.266
	Medio	241.162.454	3.004.292.964
	Bajo	161.611.112	2.494.748.073

En la tabla 1.6 se presenta la información del número de casos evitados con el Programa a 20 años. En la tabla 1.5 se muestran los beneficios en salud por efecto y agregados a través de efectos y años descontados a una tasa del 12% anual usando los parámetros de valoración canadienses descritos en la sección anterior. Cabe hacer notar algunos aspectos de los resultados que surgen de este ejercicio de valoración. En primer lugar resulta interesante constatar que la morbilidad aporta más a los beneficios totales que la mortalidad cuando usamos los parámetros de valoración nacional. Esto es importante porque sugiere que no se deben descuidar los efectos sobre morbilidad.

En segundo lugar, se debe notar la enorme diferencia en la estimación de los beneficios en salud cuando se usan los valores nacionales *versus* los valores tomados del trabajo de Canadá. Esto ilustra la afirmación de que los valores nacionales sólo pueden ser considerados como una cota inferior de los verdaderos beneficios en salud. Por último es interesante destacar que los beneficios estimados son de una magnitud considerable y son crecientes en el tiempo.

La razón para esto es que las caídas en PM_{10} consideradas son significativas, del orden del 50%, y la población expuesta está creciendo así como también lo hace la línea base de PM_{10} contra la cual se compara. (Sánchez, Valdéz & Ostro, 2006).

1.6.6. Calidad del Aire en Santiago, Chile: un Modelo de Acercamiento II. $PM_{2.5}$, PM_{10} y Material Particulado

Datos ambientales monitoreados en Santiago de Chile, fueron analizados usando modelos de aproximación con el objetivo de evaluar las contribuciones de las diferentes actividades económicas en los niveles de contaminación del aire. El modelo de aproximación fue aplicado a PM_{10} , $PM_{2.5}$ y grueso ($PM_{10}-PM_{2.5}$) de material particulado (PM); el periodo analizado fue 1989-1999. Un modelo lineal para cada uno de las fracciones de PM fue obtenido, teniendo como variables independientes concentraciones de CO y SO₂, Más un término proporcional (velocidad de viento)⁻¹ de masas de generación de emisiones de no-combustibles secundarios; hollín húmedo fue incluido como otra variable independiente. El modelo de identificación mostró buenos resultados para todos los

parámetros diferentes a través de todas las estaciones de monitoreo. Las mediciones realizadas de CO y SO₂ para 1989-1995 están de acuerdo a priori con estimaciones durante el mismo período. Además las estimaciones para las fracciones de PM estuvieron de acuerdo con los monitoreos para los sitios de vientos arriba. Los resultados muestran que aquellas fuentes de transporte se han hecho los contribuidores dominantes a los niveles de PM, mientras las fuentes inmóviles han disminuido sus contribuciones en los años pasados. La importancia relativa de fuentes móviles para las concentraciones ambientales de PM_{2.5} se han doblado en los 10 años pasados, mientras que fuentes inmóviles han reducido a su correspondiente contribución a la mitad en los inicios de los años 1990. Las estimaciones de los modelos de fondo regional de PM_{2.5} y PM₁₀ tienen el 50 % y 22 % de disminución respectivamente, en el pasado decenio; parte mas gruesa no ha mostrado ningún cambio significativo.

El acercamiento que persigue este trabajo es factible para ciudades o regiones donde comprensivamente, los modelos de transporte y química de los contaminantes no son disponibles aún, pero las estimaciones de contribuciones de calidad de aire son necesarias para objetivos de política. La metodología requiere datos sobre medidas de calidad de aire ambientales y la meteorología superficial. (Jonquera & Pontificia Universidad Católica de Chile, 2001).

La conclusión final es que hay necesidad de una estrategia de reducción de emisión más intensiva para Santiago, enfocando en fuentes móviles, las autoridades de Pisco deberían adoptar la misma postura para sus políticas ambientales.

1.6.7. Enfermedades Asociadas a la Polución Atmosférica por Combustibles Fósiles. Aspectos Pediátricos

El objetivo del trabajo es divulgar entre los pediatras las enfermedades asociadas a la contaminación atmosférica generada por la combustión de los combustibles fósiles: carbón, petróleo y derivados y gas natural. Material y métodos: Revisión bibliográfica de los últimos 25 años obtenida principalmente de la base de datos Medline y de la United States

Environmental Protection Agency sobre los efectos en la salud humana de los combustibles fósiles. Se han seleccionado los trabajos más importantes y de sus referencias se han recuperado los más relevantes de los años previos a la búsqueda. Resultados: El uso industrial y urbano de los combustibles fósiles genera contaminantes físicos (acústicos y radiaciones electromagnéticas) y químicos (CO₂, NO_x, SO₂, material particulado, CO, sustancias químicas peligrosas y sustancias radiactivas). Las sustancias químicas peligrosas más importantes son:

a) inorgánicas (arsénico, cadmio, cromo, cobalto, plomo, manganeso, mercurio, níquel, fósforo)

b) orgánicas (benceno, formaldehído, naftaleno, tolueno y pireno). Las sustancias radiactivas son del grupo del Uranio-238, Thorio-232, Potasio-40.

Todos los contaminantes producen efectos adversos en la salud humana, destacando por su frecuencia y gravedad las enfermedades bronco-pulmonares.

Conclusiones:

- Los combustibles fósiles generan contaminantes medioambientales físicos y químicos con un impacto adverso en la salud humana.
- Los efectos en las personas se manifiestan a corto, medio y largo plazo potenciando los producidos por los contaminantes preexistentes.
- Afectan principalmente a la población pediátrica, mujeres embarazadas, personas mayores y a las que padecen enfermedades respiratorias y cardiovasculares.
- La población pediátrica es especialmente vulnerable por su mayor tasa metabólica, inmadurez anatomofisiológica y por su actividad diaria al aire libre. Las enfermedades asociadas oscilan desde banales (conjuntivitis, rinitis, faringitis...) hasta graves y potencialmente mortales (bronquitis asmática, enfermedad pulmonar obstructiva crónica, insuficiencia cardíaca e incremento del riesgo de cáncer (Ferris, García, López & Ortega, 2001).

1.6.8. Cómo Estimar los Efectos de la Contaminación Atmosférica en la Salud

La contaminación atmosférica por material particulado respirable (PM₁₀) es una mezcla heterogénea de sustancias químicas y partículas de tamaño menor a 10 micrones, a la que regularmente está expuesta la mayoría de la población. En Santiago, durante los meses de invierno, las concentraciones de PM₁₀ sobrepasan en varias ocasiones los límites que aconsejan las normas norteamericanas de calidad ambiental. Por otro lado, estudios epidemiológicos realizados en los Estados Unidos han detectado una asociación entre PM₁₀ y diversas consecuencias adversas para la salud, entre las que se incluyen mortalidad prematura, ingresos en hospitales, visitas a salas de urgencia, ataques de asma, síntomas respiratorios y disminuciones de la función pulmonar.

Es importante, por consiguiente, tratar de cuantificar los impactos de estas concentraciones, ya que ello permite poner en perspectiva los posibles beneficios de controlar la contaminación y, a la vez, priorizar las políticas públicas respecto del control de la contaminación *versus* otras inversiones en salud pública.

Para estimar los efectos en la salud asociados con la contaminación, en este trabajo se propone una metodología basada en estudios de series cronológicas que relacionan cambios diarios en la contaminación atmosférica con la incidencia diaria de un efecto sobre la salud. De especial interés aquí —se señala— es la relación entre exposición a material particulado y mortalidad, ya que los efectos sobre la mortalidad tienden a dominar los costos económicos de la contaminación atmosférica. En el caso de Santiago, a partir de datos locales disponibles, al aplicar esta metodología se obtiene un cambio porcentual estimado en mortalidad del orden de 1% asociado a cambios de 10 µg/m³ en concentraciones de PM₁₀.

En Chile, futuras investigaciones y recopilaciones de datos pueden ayudar a reducir algunas de las incertidumbres inherentes a esta metodología. Por ejemplo, monitores adicionales de PM₁₀ ubicados fuera de la zona comercial central mejorarían la asignación de exposiciones a la población. También sería útil el monitoreo de partículas finas (material particulado de menos de 2,5 micrones de diámetro), ya que es probable que estas pequeñas

partículas sean más tóxicas que algunas de las partículas más grandes incluidas en el PM₁₀.

Otros estudios epidemiológicos sobre diversas consecuencias para la salud ayudarían a verificar los efectos sugeridos a partir de estudios realizados en Estados Unidos y Europa. Finalmente, estudios locales sobre el valor económico que les asignan las personas a ciertas consecuencias en la salud y a las disminuciones de riesgo, eliminarían la necesidad de extrapolar de estudios llevados a cabo fuera de Chile. (Ostro, 2000).

1.7. ESTUDIOS EN PERU

El Perú no estuvo exento de realizar estudios relacionados con el PM₁₀, diversas instituciones civiles y extranjeras realizaron trabajos de investigación en diversas regiones nacionales con distintos objetivos.

1.7.1. Estudio Epidemiológico por Exposición a Contaminantes Atmosféricos de la Población en Riesgo de Arequipa 2004

Los objetivos fueron medir la prevalencia de afecciones a la salud asociadas a contaminantes atmosféricos y medir los niveles de exposición por CO y PM₁₀ en unidades de estudio seleccionadas. Se realizó un estudio epidemiológico de carácter ecológico, de tipo transversal, con componentes analítico e interpretativo. Las áreas y unidades de estudio fueron vecinos de Nicolás de Piérola (240) y San Lázaro (507), elegidas por los antecedentes de alta contaminación atmosférica, además se estudió el área de Ciudad mi Trabajo (330), de tipo urbana y perteneciente a otra cuenca climatológica. Además se estudiaron los grupos de: comerciantes (255), policías de tránsito (102) y transportistas (169). El total de la población estudiada fue 1,603 Para el estudio específico de exposición a CO y PM₁₀, se seleccionaron casos tipo de cada grupo y en cada área, Amas de casa 5, Comerciantes 5, Transportistas 4 y Policías de Tránsito 4. El total de personas estudiadas por exposición a CO y PM₁₀ fueron 18 La técnica para el diagnóstico de afecciones fue el examen clínico médico, realizado por médicos generales, con elaboración de una Historia Clínica básica a cada miembro de la familia que incluyó el examen físico preferencial. Además se observó y aplicó un cuestionario sobre las condiciones ambientales de las viviendas y antecedentes de fallecimientos en las áreas de estudio.

Este estudio arribo a las siguientes conclusiones:

- Las prevalencias de afecciones en los residentes de las tres áreas fueron estadísticamente diferentes, con una $p < 0.01$. Las afecciones asociadas a contaminantes atmosféricos en las áreas fueron en orden de frecuencia: Rinitis alérgica, Conjuntivitis alérgica, Faringitis crónica, Dermatitis alérgica, Asma bronquial y Bronquitis crónica.
- La prevalencia de afecciones asociadas a contaminantes atmosféricos en los grupos estudiados fue en grado más alta en el grupo de policías de tránsito. Las afecciones asociadas a contaminantes atmosféricos en los grupos fueron en orden de frecuencia: Rinitis y Conjuntivitis en Amas de casa 177 y Comerciantes; Conjuntivitis y Rinitis en Transportistas, y Rinitis y Faringitis en Policías de Tránsito.
- La prevalencia de afecciones asociadas a contaminantes atmosféricos en los residentes de las áreas estudiadas no fue estadísticamente diferente entre los sexos.
- La prevalencia de afecciones asociadas a contaminantes atmosféricos en los residentes de las áreas estudiadas fue mayor en los grupos etáreos de 45 a 64 años y entre los 65 a más años. La prevalencia de afecciones asociadas a contaminantes atmosféricos en el grupo de Comerciantes fue de más alta en la edad de 65 años a más, en los Transportistas en la edad de 20 a 44 años y los Policías en la edad de 19 años.
- La prevalencia de afecciones asociadas a contaminantes atmosféricos según el tiempo de residencia fue en Nicolás de Piérola más alta en quienes residían más de 21 años y entre 1 a 5 años; en San Lázaro la mayor prevalencia fue entre los que tenían un tiempo de residencia en el área mayor a 21 años y entre 11 a 20 años; y en Ciudad mi Trabajo entre los que tenían más de 21 años y de 11 a 20 años.
- El factor hábito de fumar, tiene relación con la presentación de afecciones asociadas a contaminación atmosférica en los residentes
- La exposición a material particulado PM_{10} , en el área de Nicolás de Piérola fue más alta en el grupo de Policías de Tránsito con un promedio diario de $273.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y $218.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$; le siguen los Transportistas con un promedio diario de $232.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y de $157.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Luego están los Comerciantes con $162.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $110.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

$\mu\text{g}/\text{m}^3$; finalmente las Amas de Casa con $140.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $90.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el área de San Lázaro la exposición a material particulado PM_{10} fue más alta en el grupo de Transportistas con un promedio diario de $318.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $171.69 \mu\text{g}/\text{m}^3$; seguido de las Amas de casa con $272.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $173.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$; luego están los Policías de Tránsito con $227.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $134.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Finalmente luego están los Comerciantes con $176.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $174.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En general el grupo más expuesto a PM_{10} fue el de Transportistas (promedio general de $220.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), seguido muy de cerca por los Policías (promedio general de $213.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$), luego están los Comerciantes (promedio general de $158.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y finalmente las Amas de casa (promedio general de $151.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$). (Quico, 2004).

1.7.2. Informe de Grupo Técnico II Monitoreo Ambiental (Comisión de Desarrollo Sostenible de Paracas)

La bahía de Pisco Paracas y su entorno constituye uno de los principales ecosistemas marino costeros de alta importancia económica y ambiental del país, por los abundantes recursos naturales que en ella existen, así como por ser receptor de los contaminantes de origen humano y natural que se generan en el ámbito de influencia directa e indirecta, lo cual está causando impactos ambientales críticos, principalmente sobre los recursos hidrobiológicos, y por ende afectando la economía de la población que se dedica a la pesca artesanal, así como la conservación del ambiente, lo cual requiere una adecuada respuesta en el marco de la Gestión Ambiental del país.

Al respecto, la Comisión de Desarrollo Sostenible de Paracas (CDSP), creada mediante D.S N° 029-2003-EM, viene realizando esfuerzos orientados a establecer los criterios y lineamientos para establecer un Plan para el Desarrollo Sostenible de la Bahía Pisco Paracas; en este contexto se ha realizado la evaluación de todos los aspectos relacionados con los monitoreos ambientales que se han realizado en el ámbito de la CDSP, así como la evaluación general -en base a la información disponible- de los problemas relacionados con la contaminación ambiental, principalmente del medio marino.

El Grupo Técnico II de Monitoreo Ambiental, creado en el marco de la CDSP, ha desarrollado las acciones orientadas a la elaboración de un informe técnico conteniendo la evaluación de las actividades de monitoreo ambiental de las entidades públicas y privadas en la zona, así como una interpretación de la situación ambiental en base a dicha información, y los criterios y propuestas para realizar un monitoreo ambiental integral en la Bahía de Paracas y su entorno. Para su formulación, se contó con el apoyo de diversas instituciones tanto del ámbito local como de nivel nacional; quienes en reuniones de trabajo, en primera instancia definieron el contenido básico del presente informe, cuyo desarrollo ha sido elaborado con la información básica y los aportes hechos por las instituciones participantes.

Con respecto a la calidad del aire y emisiones atmosféricas en las áreas aledañas a las planta siderúrgica de Aceros Arequipa y la planta de Fundición de MINSUR, en algunas oportunidades se han sobrepasado los Estándares de Calidad Ambiental del Aire (ECAs), por ejemplo en la Planta Aceros Arequipa en el 2002 y 2003 el PM_{10} sobrepasó los ECAs, en tanto que sobre la calidad de las emisiones los parámetros como CO, Fe, Pb y Emisiones de Material Particulado excedieron los Límites Máximos Permisibles sectoriales (LMPs). En cuanto a la Planta de FUNSUR, el PM_{10} en el 2003 excedió ligeramente el ECA. Cabe indicar que los monitoreos ambientales tienen un ámbito muy reducido, el cual se circunscribe en las áreas aledañas a las plantas de fundición. (Comisión para el desarrollo sostenible de la bahía de Paracas, 2004).

1.7.3. Estudio de la Calidad del Aire de la Ciudad de Lima Metropolitana 1996 - 2000

La vigilancia de la calidad del aire de la Ciudad de Lima, se inició en 1986 con monitoreos periódicos en la Estación de Monitoreo CONACO, ubicada en la intersección de la Av. Abancay con Jr. Ancash. Desde 1996, dicha Estación proporciona resultados continuos de la calidad del aire y permite evaluar principalmente el impacto atmosférico del tránsito vehicular en el Centro Histórico de Lima. Años más tarde, en vista a la necesidad de conocer detalladamente el problema de contaminación atmosférica que afecta la Ciudad de Lima, es que en abril de 1999 se realizó una evaluación exhaustiva de la Calidad del Aire de las 5 zonas de la Ciudad de Lima, en

donde se identificó que el principal problema de contaminación estaba relacionado a la presencia de partículas en suspensión (polvo), las cuales provenían en su mayoría del tránsito vehicular (hollín) (Tabla 1.7.3). Es en vista a los resultados obtenidos, que la Dirección General de Salud Ambiental DIGESA, fortaleció el Programa Nacional de Vigilancia de la Calidad del Aire en la Ciudad de Lima, incluyendo 1 estación de Partículas Totales en Suspensión en cada una de las 5 zonas de la Ciudad de Lima. Hoy en día, la DIGESA realiza una vigilancia continua de la calidad del aire de la Ciudad de Lima y analiza a su vez la concentración de metales pesados en el ambiente, importantes para el seguimiento de las acciones ambientales emprendidas por el estado, como lo es entre otros el retiro del plomo tetraetilico de los combustibles, el cual gracias a la vigilancia de la calidad del aire se ha podido comprobar su reducción en el aire por debajo de los Lineamientos de la Organización Mundial de la Salud.

Hoy por hoy, la DIGESA en coordinación con otros Sectores del Estado, vienen desarrollando y aplicando una serie de medidas ambientales destinadas a abatir los problemas de contaminación atmosférica, que abarcan entre muchas otras, la revisión de las Normas Técnicas Peruanas de Combustibles, las Revisiones Técnicas, la arborización de las ciudades, así como la implementación de Redes Automáticas de Vigilancia de la Calidad del Aire que permitan evaluar las medidas ambientales aplicadas en el país y elaborar Planes de Contingencia que prevengan la exposición de la población a concentraciones peligrosas para la salud humana.

Tabla 1.8. Zonas de mayor contaminación atmosférica por partículas.

ZONAS DE MAYOR CONTAMINACION ATMOFERICA POR PARTICULAS

N° de Orden	PTS	PM10
1	Lima Este	Lima Este
2	Lima Norte	Lima Sur
3	Lima Centro	Lima Norte
4	Lima Sur	Callao
5	Callao	Centro

Conclusiones Para Gases y Partículas

Se puede decir que las menores concentraciones se registran en zonas cercanas a la costa y se incrementan a medida que se avanza hacia las zonas este y norte de Lima. Esto en razón a que los vientos predominantes provenientes del sur (s) y sur oeste (sw), arrastran los contaminantes atmosféricos generados en la costa, centro y sur de la capital, hacia las zonas de lima este y lima norte, en donde se registran las mayores concentraciones contaminantes de la ciudad de lima. (DIGESA, 2000).

1.7.4. Tormentas de Arena y Vientos Superficiales en el Área de Chala hasta Pisco, Sur de Perú

El cinturón costero del sur de Perú se distingue por sus extensas y variadas dunas de arena. La mayor parte de la arena se encuentra en una franja de 300km que comienza a 200km al sur de Lima entre las ciudades de Pisco sobre el norte y Chala sobre el sur. La arena es recogida de las playas del Océano Pacífico por los vientos casi invariantes del sur del sudeste y movido hacia el interior a sitios donde se localizaran en masas de arena enormes (" mares de arena " o "ergios", según el autor), generalmente en elevaciones altas. El escritor trazó un mapa del movimiento de la arena y la acumulación de las masas de arena en esta interesante entre 1959-1961 con fotos aéreas, el trabajo que es en parte inédito y en gran parte desconocido. Ocho masas de arena fueron trazadas en mapa; un noveno (Cerro Blanco) se ubico justo fuera del área de cobertura de la foro aérea. Si es asumida una profundidad de arena media de sólo 10m para el la masa de arena más grande en Ica en la parte del norte del área, aquella masa contiene casi 12 billones de toneladas de arena y cubre 900km². Uno de los rasgos únicos de este estudio fue el trazar un mapa de la dirección del movimiento de la arena que indica la dirección de vientos predominantes superficiales. A cierta distancia de la costa, estos vientos tienen una dirección casi constante del sur-sudeste. Mas hacia adentro, los vientos soplan en grandes y amplios arcos en el sentido de las agujas del reloj debido al arrastre friccional y otras fuerzas como el viento que se mueve en diagonal del océano sobre la desigual superficie de tierra. Sin embargo, hay una modificación de la dirección de viento por topografía, un ejemplo bueno es la obvia división del viento alrededor de ambos lados de Cerro Huaricangana (elev. = 1725 m) en el centro del área de estudio. Pero el modelo de viento más interesante ocurre en un área de alivio sometido y

elevación baja cerca de Ica (elev. aprox. 400 m), donde la playa converge en las masas de arena de Ica congregándose de direcciones casi de enfrente, es decir del noroeste, oeste, hacia el sudoeste y sudeste. El amplio barrido de ángulo (1401) de playa entrante aquí, como se cree, es Único en el mundo. Una imagen Landsat fue usada determinar como este viento insólito modela Podría desarrollarse (visto el Higo 9), pero la rotación extrema local de los vientos totalmente no es entendida. Una idea propuesta aquí por el autor consiste en que los vientos surface/near-surface se mueven como Vortices horizontal, no en aerodinamiza como generalmente es asumido, y esto es la interacción de el Vortices y la superficie de tierra que causa el penetrante en el sentido de las agujas del reloj se balancean en la dirección de viento. (Gay, 2004).

1.7.5. Evaluación de la Calidad del Aire de la Ciudad de Pisco

La evaluación de la calidad del aire de la Ciudad de Pisco se realizó del día 11 al 15 de febrero del 2002. Dicha evaluación comprendió dos distritos de la provincia de Pisco. El estudio de calidad del aire de Pisco comprendió 5 estaciones fijas de muestreo, en las cuales se instalaron equipos activos de Alto Volumen y Bajo Volumen para el muestreo de Partículas Totales en Suspensión (PTS) y Partículas Menores a 2.5 Micras ($PM_{2.5}$) respectivamente, así mismo sistemas de muestreo para la determinación de Dióxido de Azufre (SO_2) y Dióxido de Nitrógeno (NO_2). Los metales pesados en el aire fueron determinados a partir de la muestra obtenida de Partículas Totales en Suspensión. Para la ejecución del monitoreo atmosférico, la Dirección General de Salud Ambiental DIGESA, realizó las coordinaciones necesarias con la Dirección de Salud Ambiental de Pisco y con los responsables de cada inmueble

Esta Evaluación tuvo como objetivo principal el determinar los niveles de contaminación del aire de la Ciudad de Pisco debido a las emisiones provenientes de diversas fuentes de contaminación del aire, entre ellas el parque automotor e industrial presente en dicha Ciudad.

Del estudio se tuvieron las siguientes conclusiones:

- La Dirección del viento en la Ciudad de Pisco durante la fecha de evaluación fue de Sur Oeste (SW) a Nor Este (NE), en consecuencia las emisiones generadas por las distintas fuentes localizadas al SW de la

Ciudad de Pisco podrían propagarse hacia la zona ubicada al NE de dichas fuentes, como en el caso de las estaciones de muestreo ubicadas en las cercanías a la Plaza de Armas, en las cuales se encontraron valores más elevados de algunos contaminantes, con respecto a los valores obtenidos en las demás estaciones de muestreo. En el caso de las industrias pesqueras, por no haber estado en actividad, los resultados han sido, a excepción de partículas Totales en Suspensión, bastante bajos con relación a su respectivo Valor Guía ó Estándar.

- Los valores más altos de Partículas Totales en Suspensión (PTS) y Partículas Menores a 2.5 Micras (PM_{2.5}) se determinaron en la estación de muestreo ubicado en el Hospital San Juan de Dios, la cual se localiza en la intersección de la Calle San Juan de Dios y Calle Ramón Aspillaga, cerca de la Plaza de Armas de la Ciudad de Pisco. En el caso de PM_{2.5}, todos los valores hallados están por debajo de su respectivo Estándar, mientras que en el caso de PTS supera el valor Guía de la Organización Mundial de la Salud en las estaciones de muestreo ubicadas en el Hospital San Juan de Dios, Colegio Fermín Tangüis y Jefatura Provincial de Pisco, todas las mencionadas estaciones de muestreo se localizan en el Distrito de Pisco. (DIGESA, 2002).

2. JUSTIFICACION

Las fuentes de la contaminación en la ciudad de Pisco, que generan la mayor cantidad de emisiones de PTS y específicamente PM_{10} , principalmente son de dos tipos las fijas y las móviles. Las fuentes fijas de contaminación están relacionadas con Plantas de elaboración de harina de pescado, envasado de productos pesqueros (Estas funcionan por periodos). Aceros Arequipa S.A. y otras plantas de tratamiento de metales por citar algunas. Las fuentes móviles se encuentran constituidas por los vehículos que conforman el parque automotor de Pisco.

2.1. FUENTES MÓVILES

El Grupo de Estudio Técnico Ambiental de Pisco (GESTA – Pisco) realizó diversos estudios para determinar la cantidad de parque automotor, la calidad de sus emisiones, tipo de vehículos, antigüedad, tipo de combustible, etc.

2.1.1. Inventario de fuentes móviles

El GESTA zonal aire de Pisco desarrolló una serie de investigaciones respecto a las fuentes que generan la contaminación del aire en dicha ciudad. La primera investigación tuvo como propósito “Determinar las características del parque automotor que circula en Pisco”, con esta se pudo determinar el tipo de vehículo que circulaba en forma predominante por estas calles, y el flujo horario, logrando determinar la hora pico de circulación vehicular. El objetivo de la segunda investigación fue determinar algunas características del parque automotor como son: tipo de vehículo, año de fabricación, cilindrada, consumo diario de combustible, tipo de combustible usado, recorrido en Km./día, rendimiento Km./galón, etc., es decir la información necesaria para efectuar el cálculo de las emisiones a través de la metodología de Evaluación Rápida de Inventario de Emisiones de la Organización Mundial de la Salud.

La tercera investigación consistió en la medición de las emisiones de 258 vehículos de Pisco, la cual se efectuó con el apoyo de los ingenieros y técnicos del SENATI, que también brindaron los equipos de medición. En ésta se considero la siguiente información: numero de placa del vehículo, tipo de

vehículo, año de fabricación, velocidad promedio de recorrido, tipo de combustible usado, rendimiento por galón. En vehículos gasolineros se midieron emisiones de CO, HC, CO₂ y NO_x, en los vehículos que usaban Diesel se midió el grado de opacidad" (GESTA zonal Pisco, 2006).

Tabla 2.1. Emisiones de contaminantes del parque vehicular de la cuenca atmosférica de Pisco.

TIPO DE EMISIÓN	VEHÍCULOS DE USO PRIVADO		VEHÍCULOS DE USO PÚBLICO		TOTAL (TM/año)
	(TM/año)	%	(TM/año)	%	
SO ₂	17.94	15.78	94.71	84.22	112.45
CO	968.28	33.39	1931.79	66.61	2900.07
COV	149.60	17.88	686.94	82.12	836.54
NO _x	177.06	11.34	1384.05	88.66	1561.12
PTS	12.86	9.58	121.61	90.42	134.48
Pb	4.75	44.94	5.82	55.06	10.57

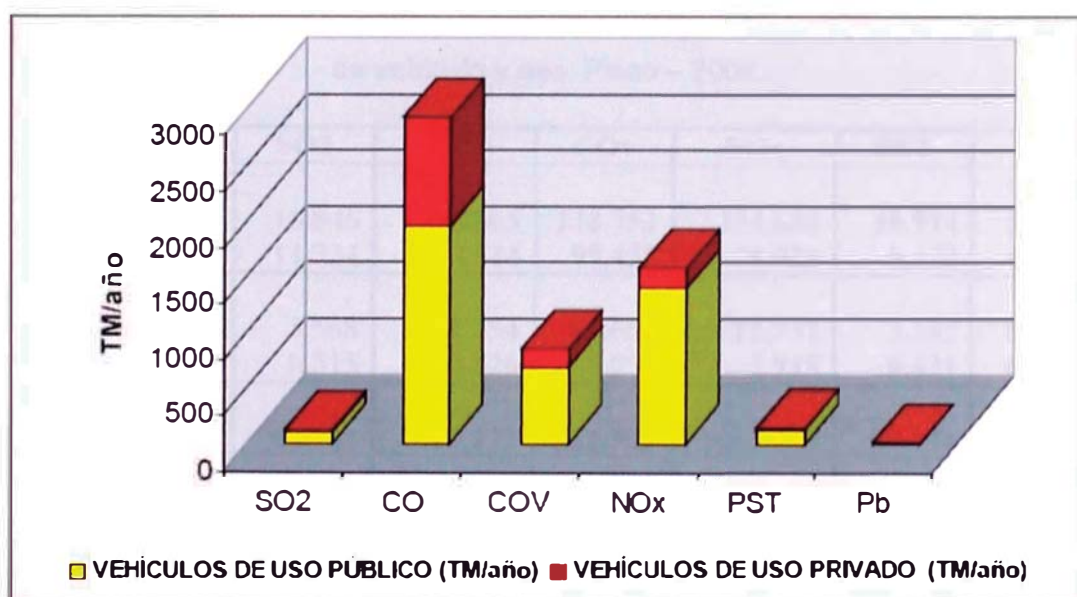


Figura 2.1. Inventario de Emisiones de Fuentes Móviles por Tipo de Uso del Vehículo. PISCO. 2004.

Al momento de analizar los cuadros, podemos notar que las emisiones del parque automotor de uso público, exceptuando las emisiones de plomo, son ostensiblemente mayores a las emisiones del parque automotor de uso privado,

esto debido en gran parte al mayor recorrido mayor que desarrollan los vehículos públicos frente a los privados.

Tomando en cuenta a las emisiones por tipo de vehículo, el informe nos dice que “Las emisiones de todos los contaminantes son predominantemente realizadas por los ómnibus y automóviles, sean estos públicos o privados. Si consideramos el tipo de emisión tenemos que el Dióxido de Azufre (SO₂) es mayoritariamente producido por los ómnibus (54.02%), el Monóxido de Carbono (CO) por los automóviles (65.75%), los Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) por los ómnibus (38.67%) seguido de los automóviles, los Óxidos de Nitrógeno (NO_x) son producidos mas por los ómnibus (65.03%), también las Partículas Totales en Suspensión (PTS) también por los ómnibus (66.31%) seguido de los camiones y mixtos (camiones adaptados para transporte de personas y carga); el Plomo (Pb) es mayoritariamente producido por los automóviles (89.57%), esto es debido al tipo de combustible utilizado” (GESTA zonal Pisco, 2006). (Ver fig. 2.2.)

Tabla 2.2. Inventario de emisiones de fuentes móviles. Según emisiones (tm/año), tipo de vehículo y uso. Pisco – 2004.

LOCALIDAD	SO ₂	CO	CO _v	NO _x	PTS	Pb
AL TOMOVIL						
Publico	16.846	1072.563	138.752	134.634	10.914	5.112
Privado	11.724	834.114	99.455	78.020	5.172	4.356
COMIBUS						
Publico	3.568	81.454	11.668	17.737	3.233	0.460
Privado	0.515	13.526	1.853	2.915	0.421	0.089
OMNIBUS						
Publico	60.741	407.172	323.506	1015.140	89.171	0.000
MOTOS						
MOTOTAXIS						
Publico	0.930	227.200	154.909	0.826	1.239	0.000
Privado	0.139	33.942	23.143	0.123	0.186	0.000
CAMION-MIXTO						
Publico	8.493	117.040	37.155	149.990	11.2614	0.246
Privado	5.252	73.033	23.170	91.821	6.810	0.231
OTROS						
Publico	3.933	26.363	20.946	65.726	5.800	0.000
Privado	0.314	13.669	1.975	4.183	0.270	0.072
TOTAL	112.450	2900.070	836.540	1561.1120	134.480	10.570

Otra de las investigaciones realizadas fue la medición de las emisiones de 258 vehículos, los cuales fueron en su mayoría automóviles; en ésta se pudo determinar que el 23.2% de ellos excedía el límite máximo permisible de emisión de CO, el 60.2% de CO₂ y 8.4% de emisión de hidrocarburos. A los vehículos petroleros se les midió la opacidad encontrándose una excedencia de los límites máximos permisibles del 52.78%; todo esto nos informa sobre el mal estado de mantenimiento que tiene el parque automotor de la Ciudad de Pisco. Algo que debemos remarcar es que hay una relación inversa entre la antigüedad del vehículo y las emisiones, o sea que a menor antigüedad del vehículo este excede los límites, tal vez esto sea debido a que los vehículos que circula no están debidamente mantenidos” (GESTA zonal Pisco, 2006).

Como se menciona anteriormente, las fuentes móviles de contaminación y generadoras de PTS y PM₁₀ la constituyen el parque automotor del cual se tiene poca información, es por esa razón que el GESTA – Pisco realizó un trabajo de recolección de información dentro de la cuenca atmosférica de Pisco “Para ello, mediante el plano catastral, previa verificación aleatoria del mismo, se hizo un conteo del total de manzanas existentes en la ciudad, de estas se extrajo una muestra aleatoria considerando un 99% de confianza, para una probabilidad del 15% de encontrar vehículos en una manzana, con un peor aceptable del 11% (error del 4%); fueron un total de 368 manzanas de muestra a la que se agregó posteriormente 21 adicionales, considerando una probable pérdida de la misma, totalizando 389 viviendas. Para considerar la representatividad de la muestra se realizó una asignación aleatoria mediante un sorteo sin reposición, estas manzanas fueron posteriormente buscadas e intervenidas por un grupo de encuestadores previamente capacitados. La encuesta aplicada consideraba las variables básicas necesarias para el cálculo de las emisiones, ubicación y reconocimiento del vehículo, como son: localidad, dirección, condición de la casa (con o sin vehículo), placa, tipo de vehículo, año de fabricación, uso privado o público del vehículo, horas de uso diario, días de uso por semana, tipo de combustible utilizado, consumo diario en galones, recorrido por día, cilindrada, encendido”. (GESTA zonal Pisco, 2006). El resumen de la data pueden observarse en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Resumen de manzanas tomadas por distrito.

LOCALIDAD	MANZANAS TOTAL	ASIGNACIÓN ALEATORIA DE MANZANAS	VEHÍCULOS ENCONTRADOS POR SECTOR	TOTAL DE VEHÍCULOS
PISCO	622	205	761	2309
SAN CLEMENTE	249	20	61	760
SAN ANDRÉS	104	41	73	185
TUPAC AMARU	177	85	119	248
PARACAS	20	14	43	61
SANTA CRUZ	44	24	28	51
TOTAL	1216	389	1085	3614

Una información al detalle de esta encuesta se puede apreciar en la fig. 2.3, allí se puede observar que la mayor cantidad de vehículos de servicio público son los automóviles (taxis, colectivos, etc.), seguido por las motos (que incluye a las mototaxis) y las combis. Respecto al parque automotor de uso privado (fig. 2.3), al igual que el de servicio público, los automóviles son los tipos de vehículos que se presentan con mayor frecuencia, seguidos por los camiones.

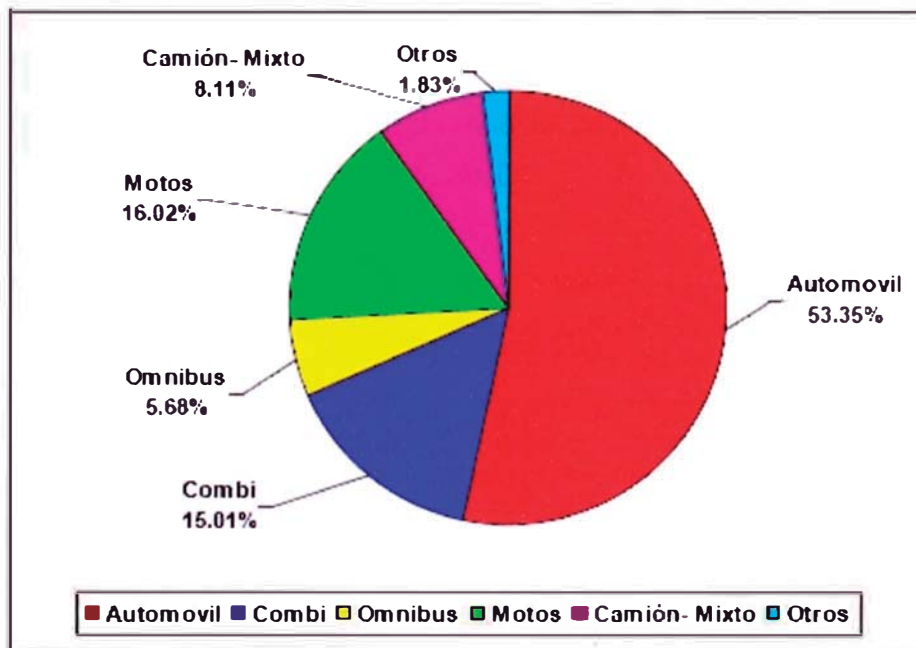


Figura 2.3. Composición del Parque Automotor Público en Pisco. Año 2004.

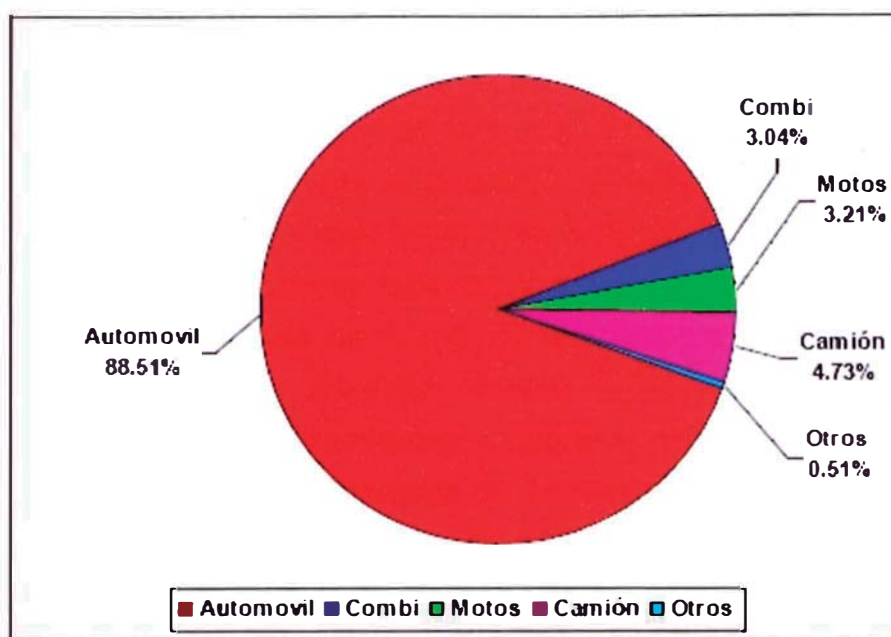


Figura 2.4. Composición del Parque Automotor Privado en Pisco. Año 2004.

“Respecto a la antigüedad del parque automotor de Pisco, tenemos que el 55.6% del transporte público y 40.2% del privado tiene 11 años o menos de fabricación, el 28.4% de vehículos de transporte público y 24.0% del privado fueron fabricados entre 1985 y 1992; el resto es más antiguo. Por lo tanto nuestro parque automotor puede considerarse antiguo, con todos los problemas que esto trae en contaminación y necesidad de recursos para mantenimiento, en especial si dicho mantenimiento no se efectúa de forma rutinaria, en especial de los vehículos de uso público que en muchas oportunidades recorren más de 12 horas diarias.” (GESTA zonal Pisco, 2006).

Tabla 2.4. Antigüedad de Vehículos Públicos y Privados.

Periodo de Fabricación	Público (%)	Privado (%)
< 1971	4.1	9.0
1972 - 1977	4.1	6.9
1978 - 1980	5.1	7.8
1981 - 1984	2.8	12.2
1985 - 1992	28.4	24.0
>= 1993	55.6	40.2

Una interesante información respecto a las fuentes móviles flotantes o no residentes, entendamos por eso como los vehículos que visitan la cuenca

atmosférica de Pisco, permanecen unas horas y luego se retiran, este hecho constituye un aumento en las emisiones diarias. "Para medir el impacto de estos se realizó una encuesta en los puntos de ingreso como son Santa Cruz y Villa Túpac Amaru, durante los 5 días de la semana. En total fueron 835 vehículos que ingresaron durante los 5 días de la semana, 33 por Santa Cruz y 802 por Villa Túpac Amaru, con un rango entre 107 y 228 por día; de estos la mayoría fueron camionetas tipo pick up (42.28%), siguiendo los automóviles y las camionetas station wagon (32.93%), también se presentaron camiones y remolcadores (20.60%). Los camiones y camionetas eran usados, sobre todo, para el trabajo en el campo y transporte de mercaderías de las industrias de la ciudad". (GESTA zonal Pisco, 2006). Ver fig. 2.5.

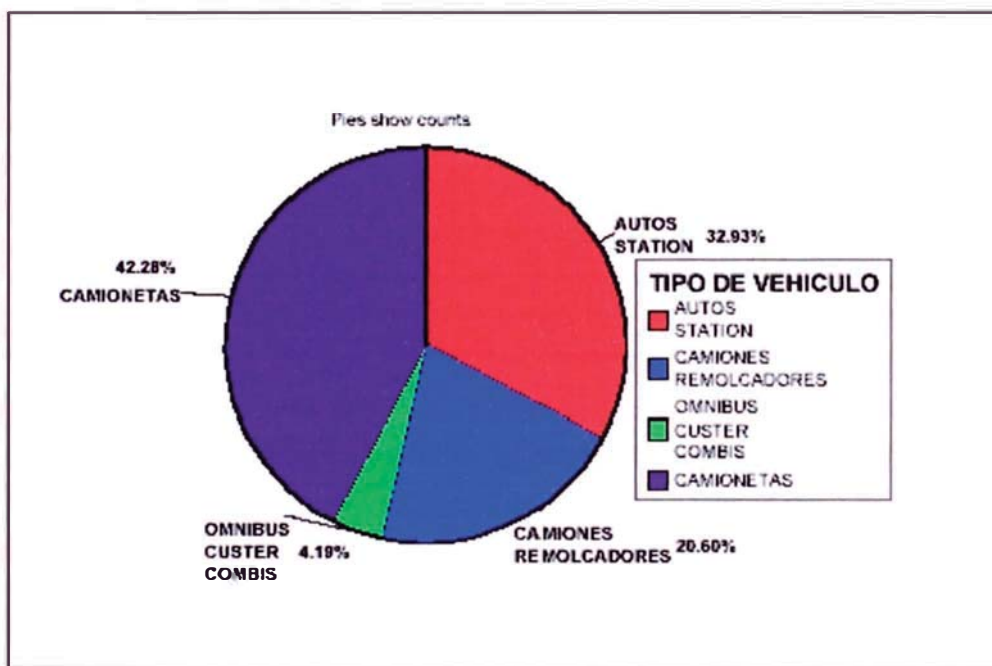


Figura 2.5. Composición de Vehículo Flotantes que ingresan a la Cuenca Atmosférica de Pisco.

2.2. FUENTES FIJAS

Actividades económicas como la extracción, transformación y de servicios constituyen la mayor ocupación de la Población Económicamente Activa (PEA) en la Provincia de Pisco. Cabe resaltar que se tiene una población

económicamente no activa de 65,10% información obtenida del INEI. “La actividad económica de la provincia de Pisco se sustenta principalmente de la actividad pesquera, sin embargo hay otros sectores que contribuyen con el desarrollo económico de la región. En el distrito de Pisco la industria manufacturera cubre un 9,60% de la actividad económica de la provincia, Paracas un 0,70% y San Andrés un 2,00%. El comercio en el distrito de Pisco cubre un 9,50% de la actividad económica de la provincia, Paracas un 0,70% y San Andrés un 1,40%. En el distrito de Pisco los hoteles y restaurantes cubren un 13,50% de la actividad económica de la provincia, Paracas un 1,10% y San Andrés un 1,80%.

Tabla 2.5. Marco censal de empresas y establecimientos – III CENEC

ACTIVIDAD ECONOMICA	Distritos		
	PISCO	PARACAS	SAN ANDRES
Industria manufacturera	9.61	0.75	1.92
Construcción	20.00	-----	-----
Comercio	9.55	0.70	1.37
Restaurantes y hoteles	13.50	1.13	1.86
Total de establecimientos (estimados)	1 259	28	172

Respecto a las actividades Industriales y Comerciales que se desarrollan dentro de la Cuenca Atmosférica de la Ciudad de Pisco, y de acuerdo a la evaluación realizada por los miembros del Gesta Zonal de Aire Pisco, se han identificado las siguientes categorías”. (GESTA zonal Pisco, 2006). (Ver tabla 2.6)

Tabla 2.6. Categorías de Fuentes de Emisión Fijas en la Cuenca Atmosférica de Pisco

Nº	Estrato	Descripción	Nombre Común	Tipo de fuente
1	Actividades de la industria alimentaria	Industrias de harina y conserva de pescado	Pesqueras	Puntuales
2		Plantas procesadoras de flor de Mansal	Agro Industria	Puntuales
3	Industria de Hierro y acero	Industria siderúrgica	Siderurgia	Puntuales
4	Producción de metales	Fundición	Fundición y Refinería de estaño	Puntuales
5	Pérdida evaporativa por manejo de combustibles al por mayor	Almacenamiento de hidrocarburos	Terminales	Puntuales
6		Industria Textil	Textilería	Puntuales
7	Industria del cuero	Industria de Cuero y Pieles	Curtiembre	Puntuales
8	Actividades comerciales y de servicios que realizan combustión	Polerías	Polerías	Área
9		Restaurantes	Restaurantes	Área
10		Fabrics de productos de panadería	Panadería	Área
11	Pérdida evaporativa por expendio de combustible	Venta al por menor de combustibles para automotores	Grifos	Área
12	Carpintería y actividades relacionadas	Fabricación de muebles	Carpintería	Área
13	Evaporación de solventes por fuentes de área	Actividades de impresión	Imprenta	Área
14		Talleres automotrices	Talleres automotrices	Área

2.2.1. Población y Desarrollo Urbano.

“De acuerdo con los resultados del último Censo de Población y Vivienda del año 1993, efectuado por el Instituto Nacional de Estadística e informática, la población urbana ubicada en la cuenca atmosférica de la ciudad de Pisco alcanzó los 90,249 habitantes, siendo el 95.13% de la población total de la Provincia, y para el año 2004 se estima que dicha población haya alcanzado los 113,813 habitantes, lo cual refleja el 95.8% del total provincial. La tabla 2.7 y la fig. 2.6 nos muestra la proyección de la población de la cuenca atmosférica”. (GESTA zonal Pisco, 2006).

Las zonas de mayor densidad poblacional se ubican en el distrito de Pisco y las de menor densidad en el distrito de Paracas (fig. 2.7).

Tabla 2.7. Proyección de la población urbana ubicada en la cuenca atmosférica de Pisco.

Distrito	ICI %	Años							
		1993*	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Pisco	2.3	51.635	66.315	67.840	69.400	70.996	72.629	74.300	76.009
Paracas	-0.1	958	948	947	946	945	944	943	942
San Andres	3.3	10.742	15.353	15.859	16.383	16.923	17.482	18.059	18.655
San Clemente	2.8	13.200	17.885	18.386	18.901	19.430	19.974	20.534	21.108
Tupac Amaru	3.3	9.314	13.312	13.751	14.205	14.674	15.158	15.658	16.175
Total Cuenca	2.3	85.853	113.813	116.783	119.835	122.968	126.187	129.494	132.889

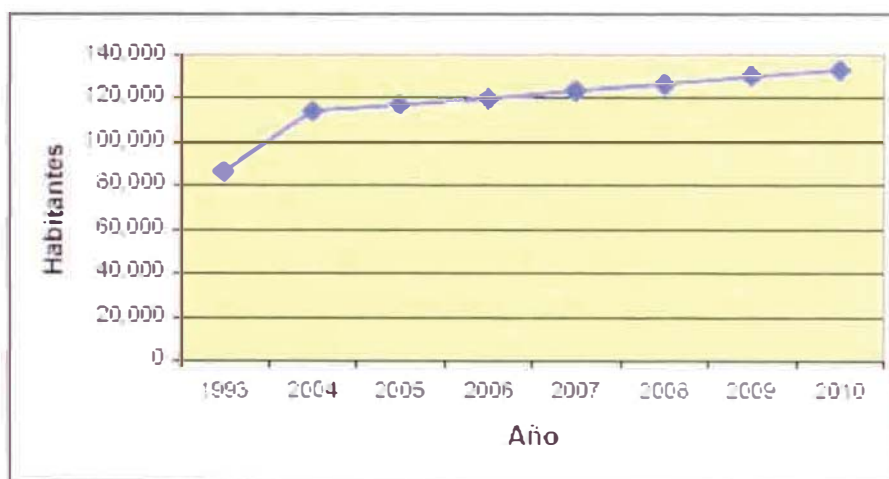


Figura 2.6. Gráfico de la proyección de la población urbana en la cuenca atmosférica de Pisco.

monóxido de carbono (CO) y los compuestos orgánicos volátiles (COV), estos son fundamentalmente producidos por las fuentes de área, llegándose a emitir valores de 3604 y 3555 Ton/año respectivamente” (Ver tabla 2.8). (GESTA zonal Pisco, 2006).

Tabla 2.8. Inventario de Emisiones Anuales de Fuentes Fijas de la Ciudad de Pisco. 2002.

Sector	Emisiones (Ton/año)						
	PTS	SO ₂	NO _x	CO	COV	H ₂ S	Pb
Fuentes Puntuales	7049	6183	1881	609	191	33	0
Fuentes de Área	5	26	249	2995	3364	0	0
Total	7054	6209	2130	3604	3555	33	0

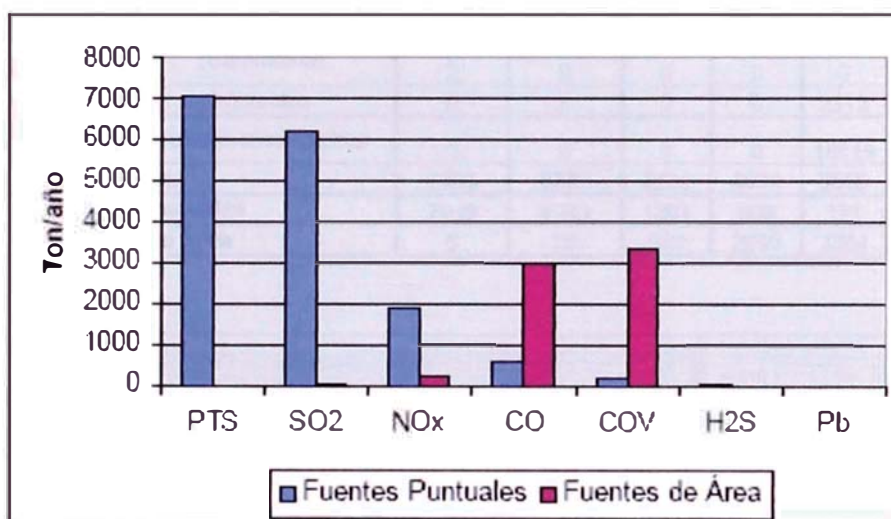


Figura 2.8. Emisiones Anuales de Fuentes Fijas de la Ciudad de Pisco. 2002.

En la tabla 2.9 se muestra el inventario de fuentes fijas desagregado para la cuenca atmosférica de Pisco, evidenciándose que los principales contribuyentes de PTS corresponden a la Industria Siderúrgica e industria de harina y conserva de pescado, que en su conjunto emiten 5786 Ton/año (82%). Asimismo, el mayor aporte de PTS corresponde a la Industria Siderúrgica e industria de harina y conserva de pescado, siendo 5787 Ton/año, que representa el 82% del total de emisiones de PTS de la cuenca.

Tabla 2.9. Emisiones de Fuentes Fijas en la Cuenca Atmosférica de Pisco en el año 2003.

Estrato	Tipo de Fuente	TM/año						
		PTS	SO ₂	NOX	CO	COV	H ₂ S	Pb
Actividades de la industria alimentaria	Industrias de harina y conserva de pescado	1905	3713	384	42	8	33	0
	Plantas procesadoras de flor de Marisol	1156	31	689	536	87	0	0
Industria de Hierro y acero	Industria siderúrgica	3882	1448	786	29	6	0	0
Producción de metales	Fundición	71	964	0	0	0	0	0
Pérdida evaporativa por manejo de combustibles al por mayor	Almacenamiento de hidrocarburos	0	0	0	0	88	0	0
	Industria Textil	35	25	22	2	2	0	0
Industria del cuero	Industria de Cuero y Pieles	<1	2	<1	<1	0	0	0
Actividades comerciales y de servicios que realizan combustión	Pollerías	1	<1	1	10	0	0	0
	Restaurantes	<1	21	246	2974	991	0	<1
	Panaderías	2	5	2	11	4	0	0
Pérdida evaporativa por expendio de combustible	Grifos	0	0	0	0	67	0	0
Carpintería y actividades relacionadas	Fabricación de muebles (Carpintería)	2	0	0	0	0	0	0
Evaporación de solventes por fuentes de área	Imprentas	0	0	0	0	2312	0	0
	Talleres automotrices	0	0	0	0	16519	0	0
TOTAL		7053	6209	2130	3604	3555	33	0
Fuentes Puntuales		7049	6183	1881	609	191	33	0
Fuentes de Área		5	26	249	2995	3364	0	0

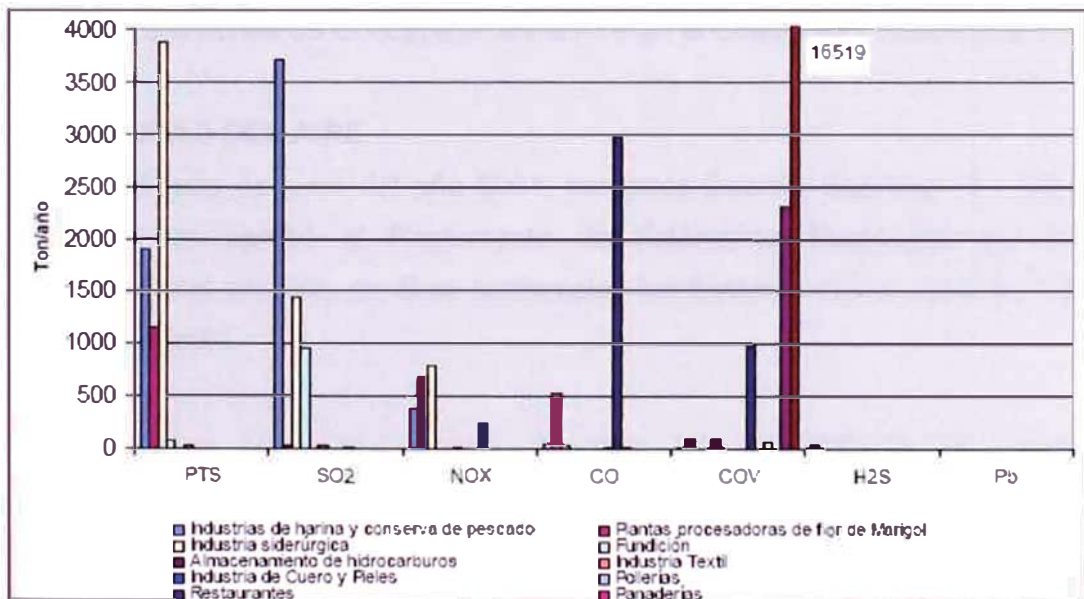


Figura 2.9. Emisiones de Fuentes Fijas en la Cuenca Atmosférica de la ciudad de Pisco.

De acuerdo a lo mostrado en la tabla 2.10 podemos observar que las mayores emisiones provienen de las fuentes fijas, en cuanto al PTS con 7054 Ton/año comparado con las 134.48 Ton/año de las fuentes móviles.

Tabla 2.10. Emisiones de Contaminantes al Aire en la Ciudad de Pisco en el año 2002.

FUENTE	Emisiones (Ton/año)						
	PTS	SO ₂	NO _x	CO	COV	H ₂ S	Pb
Fuentes Fijas	7054,00	6209,00	2130,00	3604,00	3555,00	33,00	0
Fuentes Móviles	134,48	112,45	1561,12	2900,07	836,54	0,00	10,57
Total	7188,48	6321,45	3691,12	6504,07	4391,54	33,00	10,57

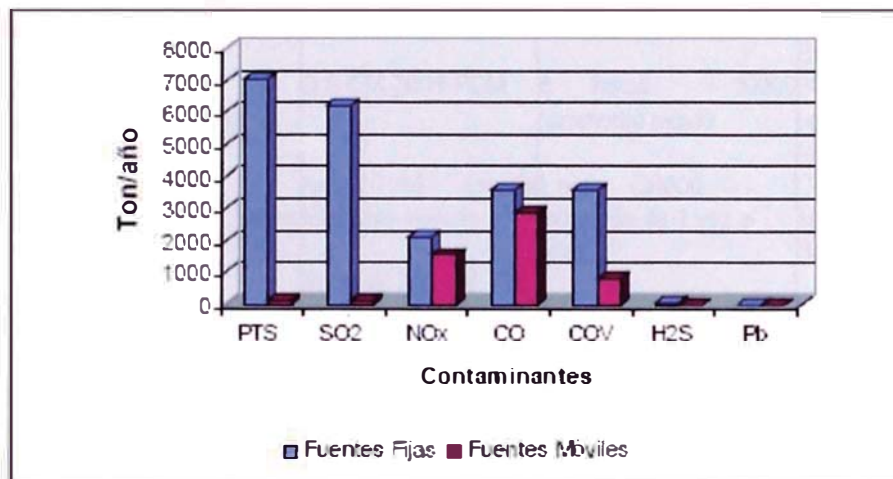


Figura 2.10. Emisiones de Contaminantes al Aire en la Ciudad de Pisco en el año 2003.

2.3. CALIDAD DEL AIRE

En el mes de junio del año 2001, mediante Decreto Supremo N° 074-2001-PCM se aprobó el Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire, en él se contemplan los Estándares así como los Valores de Tránsito.

Asimismo, mediante Decreto Supremo N° 009-2003-SA se aprobó el Reglamento de los Niveles de Estados de Alerta Nacionales para Contaminación del Aire, cuyos valores se muestran en el Capítulo 4.

Tabla 2.11. Niveles de Alerta para Contaminantes Críticos

NIVELES DE CONTAMINANTES CRITICOS				
TIPO DE ALERTA	Material Particulado (PM10)	Dióxido de Azufre (SO2)	Monóxido de carbono CO	Sulfuro de Hidrógeno H2S
Cuidado	>250 ug/m ³ promedio de 24 h	>500 ug/m ³ por 3 horas consecutivas	>15000 ug/m ³ promedio de 8 horas	> 1,500 ug/m ³ para 24 horas
Peligro	>350 ug/m ³ promedio de 24 horas	>1.500 ug/m ³ por 2 horas consecutivas	> 20000 ug/m ³ promedio de 8 horas	> 3,000 ug/m ³ para 24 horas
Emergencia	>420 ug/m ³ promedio de 24 horas	> 2,500 ug/m ³ por 90 minutos consecutivos	>35000 ug/m ³ promedio de 8 horas	> 5,000 ug/m ³ para 24 horas
Referencia	Valor estándar ECA D.S. 074-2001-PCM Anual 50 (media aritmética anual) 24 horas 150 (NE más de 3 veces al año)	Valor estándar ECA D.S.074-2001-PCM Anual 80 (media aritmética anual) 24 horas 365 (NE más de 1 vez al año)	Valor estándar ECA D.S.074-2001-PCM 8 horas 10000 (promedio móvil) 1 hora 30000 (NE más de 1 vez al año)	Valor referencial Organización Mundial de la Salud 24 horas 150 ug/m ³ (valor referencial de la Organización Mundial de la Salud)

La Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) del Ministerio de Salud para la ciudad de Pisco destino sus recursos a realizar en dos periodos campañas de monitoreo de la calidad del aire, la primera se realizó entre el 11 y 15 de febrero del año 2002, en dos distritos, Cercado de Pisco y Túpac Amaru. El segundo periodo corresponde al año 2003, entre el 16 y 23 de diciembre en los distritos del Cercado de Pisco, San Andrés y Túpac Amaru. De la misma manera, el Gesta Zonal Aire de Pisco ha venido efectuando monitoreos de Material Particulado Sedimentable, Material Particulado en Suspensión PM_{2.5}, así como de Dióxido de Azufre, Dióxido de Nitrógeno e Hidrógeno Sulfurado con la metodología de tubos pasivos.

Líneas abajo se presentan los resultados obtenidos en los monitoreos de Partículas Totales en Suspensión (PTS) y Partículas PM_{2.5}, que son de mayor interés para el desarrollo del tema que llevamos a cabo.

2.3.1. Partículas totales en suspensión y partículas PM_{2.5}

Los estudios desarrollados por la DIGESA que comprendieron sólo a los parámetros: Partículas Totales en Suspensión (PTS) y Partículas Menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}) se muestran a continuación.

Con relación a los valores hallados para PTS (ver fig. 2.11), “en todas las estaciones al menos una vez se sobrepasa el valor máximo referencial para 24 horas que para el año 1987 recomendaba la Organización Mundial de la Salud (120 µg/m³), siendo las estaciones CLAS San Andrés, Centro de Salud Túpac Amaru y la Jefatura Provincial PNP de Pisco las que excedieron éste valor con mayor frecuencia. Si bien es cierto que este parámetro no ha sido considerado en la Norma Peruana de Calidad del Aire los resultados obtenidos guardan relación estrecha con los valores obtenidos de PM_{2.5}, evidenciándose nuevamente el problema de calidad del aire en Pisco por la presencia de partículas de diversos diámetros aerodinámicos”. (GESTA zonal Pisco, 2006).

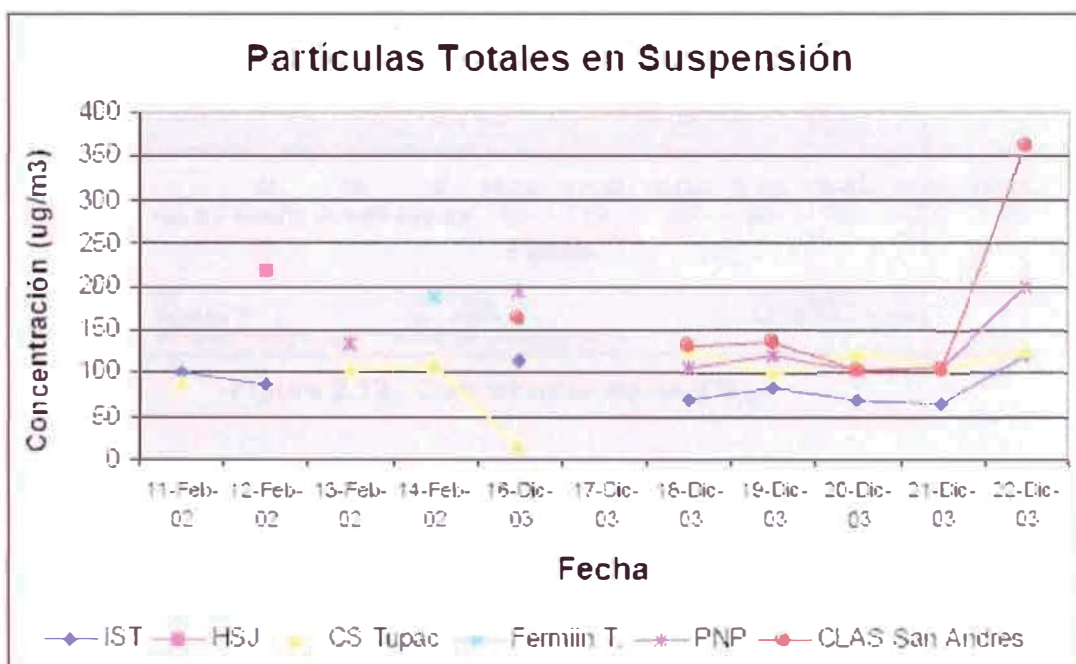


Figura 2.11. Concentraciones de Partículas Totales en Suspensión.

De los resultados mostrados en la figura 2.12 “podemos mencionar que para el caso de las partículas $PM_{2.5}$ sólo se excede el valor referencial para 24 horas el día 16 de diciembre del 2003 en la estación CLAS San Andrés, alcanzándose una concentración de $101.99 \mu g/m^3$. Respecto al valor referencial anual, aunque los datos no son suficientes para establecer un valor promedio anual, se puede observar que para todas las estaciones los valores promedios semanales o diarios son mayores al Valor Referencial Anual de $15 \mu g/m^3$, convirtiéndose de esta manera las Partículas $PM_{2.5}$ en uno de los principales problemas de calidad del aire de la ciudad de Pisco”. (GESTA zonal Pisco, 2006).

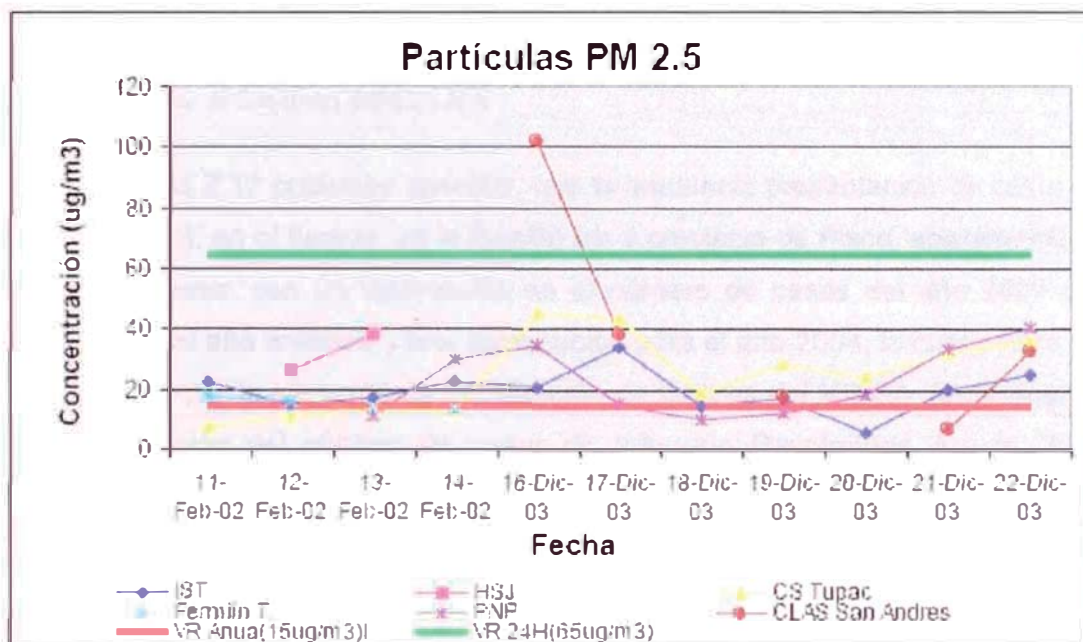


Figura 2.12. Concentraciones de $PM_{2.5}$.

2.4. IMPACTO DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN LA SOCIEDAD.

“Las enfermedades respiratorias, a menudo están fuertemente vinculadas a la contaminación ambiental, en especial a la mala calidad del aire, es por ello, que basándonos en los reportes estadísticos y epidemiológicos existentes, tratamos de mostrar algunos datos que pueden estar relacionados a la calidad del aire en la ciudad de Pisco, considerando como grupo etéreo vulnerable a los niños menores de 5 años. Para la interpretación de estos datos debemos

considerar que el Ministerio de Salud (MINSA), del cual procede la información, no atiende al 100% de niños menores de 5 años; algunos son atendidos por ESSALUD, otros por establecimientos de las fuerzas armadas y consultorios privados, de estos últimos no tenemos información.

Tabla 2.12. Frecuencia de Casos de IRA Y SOB en menores de 5 años en la Región Ica y la provincia de Pisco, atendidos en los establecimientos del MINSA. Años 2002, 2003,2004.

LUGAR	2002		2003		2004	
	IRA	SOB	IRA	SOB	IRA	SOB
REGION	96.434	5.436	106.221	5.245	82.292	4.266
PISCO	17.594	860	19.752	1.247	15.026	802
RESTO DE ICA	80.840	4.576	86.469	3.998	67.266	3.466
% PISCO DE ICA	17.87	15.82	18.77	23.78	18.26	18.79

Fuente: Oficina de Estadística DIRESA-ICA

En la tabla 2.12 podemos apreciar, que la tendencia presentación de casos de IRA y SOB, en el tiempo, en la Región Ica y provincia de Pisco, aparentemente son similares, con un incremento en el número de casos del año 2003 con respecto al año anterior, y una disminución para el año 2004, la cual podría ser explicada por la situación de paralización de labores del MINSA. Sin embargo, la proporción del número de casos de Infección Respiratoria Aguda (IRA), registrados en la provincia de Pisco, fluctúa entre el 17.87% y el 18.77%, lo cual es un porcentaje elevado considerando la población de la provincia. Los casos de Síndrome obstructivo bronquial (SOB) fluctúan entre 15.82 y 18.77%, este parece tener una tendencia creciente en el tiempo. Es casi constante a través del tiempo. El cálculo de las tasas mostradas se ha realizado considerando las poblaciones, para cada año, asignadas a la Región Ica y a la Provincia de Pisco por el INEI. Estas han sido corregidas, considerando que los establecimientos de MINSA no atienden al 100% de la población y que en la región se han producido diferentes periodos en los que las atenciones disminuyeron por razones de paros laborales. La población asignada al MINSA se ha considerado en 70% de los menores de 5 años.

Tabla 2.13. Tasas de morbilidad por IRAS en menores de 5 años en Región Ica y la provincia de Pisco, Atendidos en los establecimientos del MINSA en los años 2002, 2003,2004.

LUGAR	IRAS		
	2002	2003	2004
PISCO x 1000	2 150.99	2 265.53	2 658.51
RESTO DE ICA x 1000	3 111.65	2 720.56	2 662.41

Fuente: Oficina de Estadística DIRESA-ICA

Tabla 2.14. Tasas de morbilidad por SOB en menores de 5 años en Región Ica y la provincia de Pisco, Atendidos en los establecimientos del MINSA. Años 2002, 2003,2004.

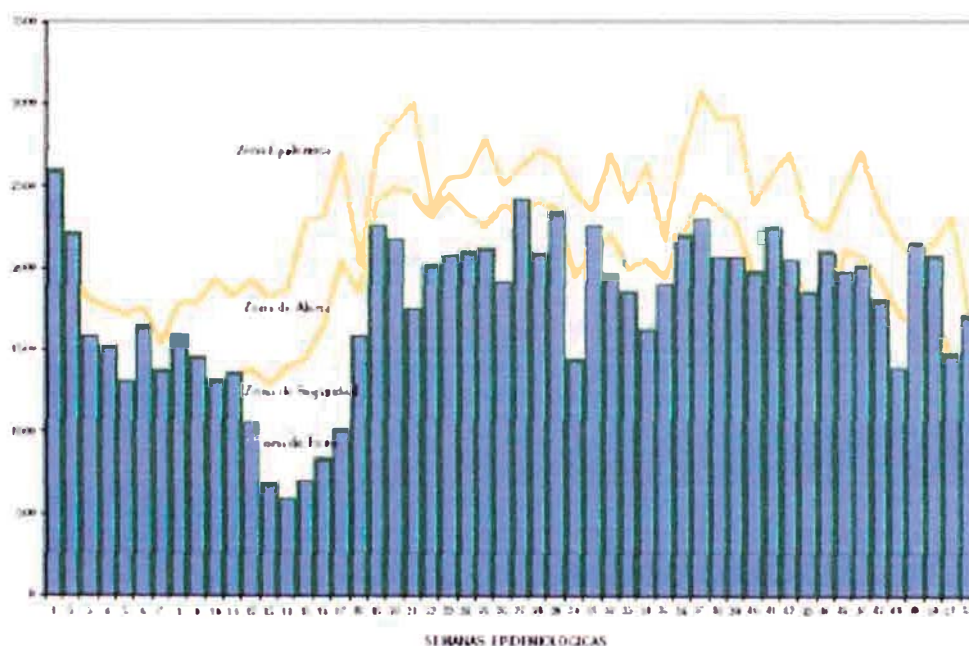
LUGAR	SOB		
	2002	2003	2004
PISCO x 1000	105.14	143.03	136.56
RESTO DE ICA x 1000	176.10	127.26	133.06

Fuente: Oficina de Estadística DIRESA-ICA

En la tabla 2.13 se observa como las tasas de morbilidad por IRAs en la provincia de Pisco tienen una tendencia hacia el incremento, no así en el resto del departamento, donde al parecer disminuye, aunque esta tasa podría estar sesgada por las atenciones prestadas en consultas privadas. Es de remarcar que la tasa de incidencia en Pisco, de ser menor que la del resto de Ica para el 2002, aumenta hasta casi nivelarse lo que podría explicarse dado que en la provincia de Pisco, cada vez más industrializada, la calidad del aire empeora día a día. Esta tendencia se observa también en los casos de SOB ya que la tasa en Pisco va en aumento llegando de 105.14 x 1000 para el 2002 a 136.56 x 1000 para el 2004; por el contrario en el resto de Ica la tasa de incidencia parece disminuir de 176.10 (2002) a 133.06 (2004) (ver tabla 2.14). Debemos remarcar que no conocemos el comportamiento en otros establecimientos de salud.

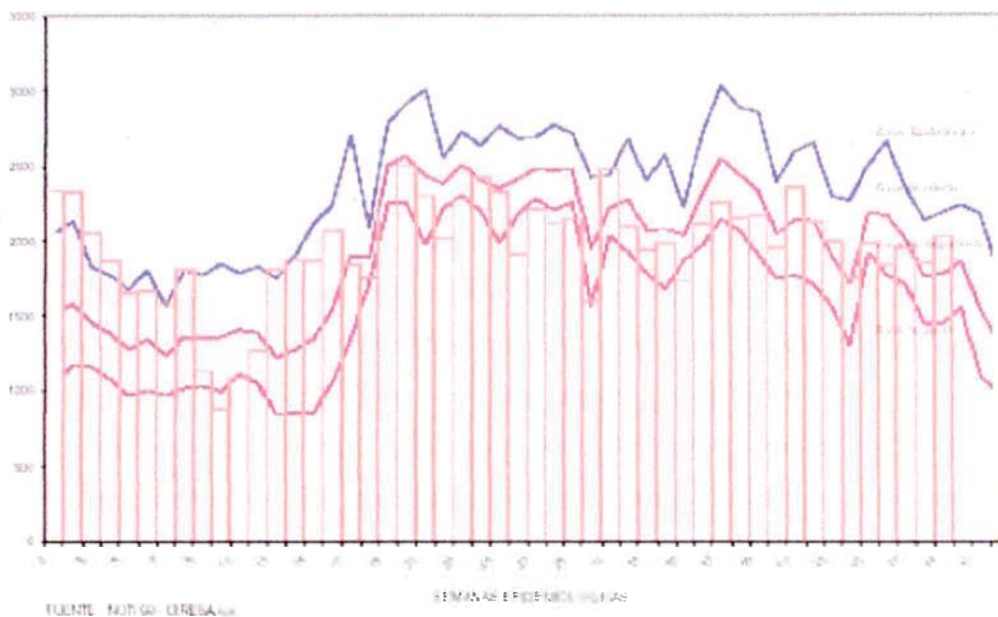
Para los casos de IRA, según el informe de la Oficina de Epidemiología de la Dirección Regional de Salud de Ica (DIRESA ICA), en la semana 52 del año

2004 se notificaron 1 710 casos de IRAs No Neumonías (TIS: 4.11 x 103 menores de 5 años), siendo el acumulado regional de 92,101 casos (TIA: 1 298.39 x 103 menores de 5 años); en relación al año anterior se observa una disminución del 21.84 % en el consolidado anual de casos (117 835 casos, TIA: 1 764.34 x 103 menores de 5 años para el 2 003). Como dijimos líneas arriba, esto puede ser explicado por la situación de paralización laboral que presentara el sector del MINSA parte del año 2004 (los datos involucran a toda la Región Ica). Pero para el 2005 informa a la semana 49. En la presente semana se han notificado 2,032 casos de IRAs No Neumonías (TIS: 28.77 x 103 menores de 5 años), siendo el acumulado regional de 95 678 casos (TIA: 1 354.71 x 103), en relación al año anterior se observa un aumento de 10.18 % en el consolidado anual de casos (86 834 casos, TIA: 1 224.13 x 103 menores de 5 años para el 2 004). El número de casos se ubica en la Zona de Alerta del canal endémico. Esto también se aprecia en las tasas calculadas por nosotros.



Fuente: Oficina de Epidemiología DIRESA-ICA

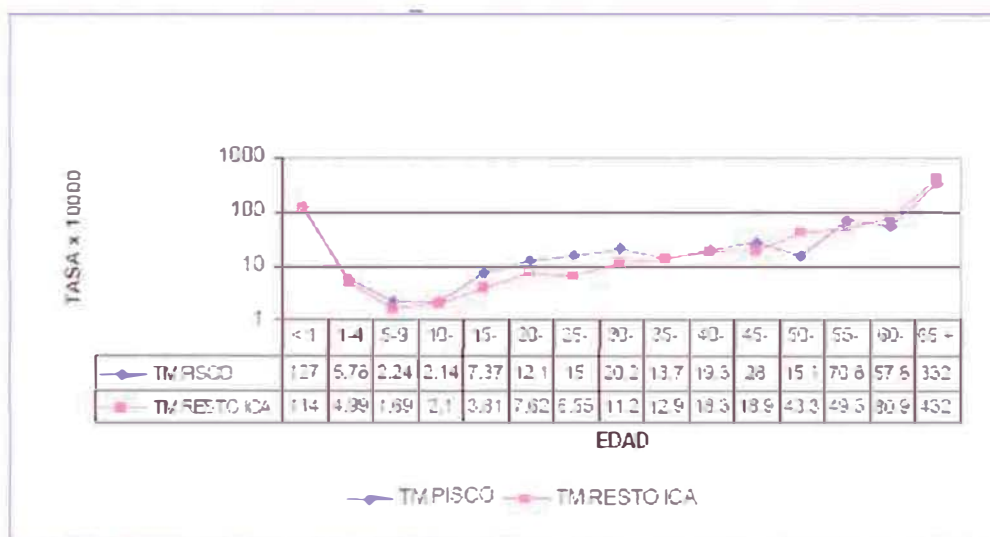
Figura 2.13. Canal endémico de las Infecciones Respiratorias Agudas
Dirección Regional de Salud ICA, Periodo 1999-2003-S.E.52-2004.



Fuente: Oficina de Epidemiología DIRESA-ICA

Figura 2.14. Canal endémico de las Infecciones Respiratorias Agudas Dirección Regional de Salud ICA, Periodo 1999-2004-S.E.49-2005.

Las tasas de mortalidad fueron elaboradas con la información proporcionada por la Oficina de Estadística de la DIRESA Ica y corresponden a la base de datos estructurada con los certificados de defunción correspondientes a todos los fallecidos en la Región incluida la provincia de Pisco.



Fuente: Oficina de Estadística DIRESA-ICA

Figura 2.15. Tasa de Mortalidad (x 10,000) Pisco y Resto de Ica. Según categoría de Edad. 2004.

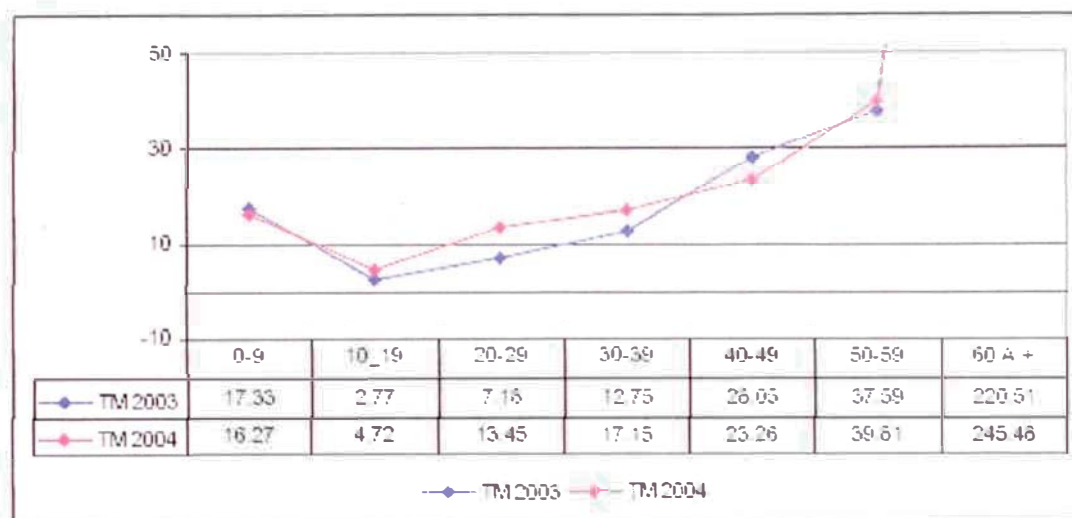
La fig. 2.15 muestra la diferencia de las tasas de mortalidad por 10,000 hab. de la Provincia de Pisco y resto de la Región Ica, es claro que la tendencia a la muerte es alta en los primeros años de vida disminuyendo a los 5 años, posteriormente hay una tendencia paulatina al incremento hasta alcanzar valores muy altos en mayores de 60 años. Es notorio un incremento en el riesgo de morir, en la provincia de Pisco, en casi todos los grupos etáreos, salvo en el de 50-54 años y en los de 60 años. Se desconocen las causas específicas que expliquen este comportamiento, pero al estar la contaminación del aire, asociada a causas de mortalidad, esto podría contribuir a su explicación.

Tabla 2.15. Frecuencia Absoluta de muertes en la provincia de Pisco en los años 2003 y 2004.

GRUPO ETAREO	0-9	10 -19	20 -29	30-39	40-49	50-59	60 A +	TOTAL
2003	43	7	17	24	40	36	232	399
2004	43	13	32	32	33	38	255	446

Fuente: Oficina de Estadística Diresa-ICA

Lo que puede observarse en la tabla 2.15 es que el grupo etáreo más susceptible de morir en Pisco (como en el resto de Ica, ver gráfico anterior), son los menores de 1 año, grupo etáreo frecuentemente afectado por IRAS, de igual forma se observa un incremento gradual en el número de muertes por cada grupo etáreo. Lo remarcable en este caso es que las muertes han aumentado, en casi todos los grupos etáreos del 2003 al 2004. Si calculamos las tasas de mortalidad, para Pisco, los años 2003 y 2004, notamos un incremento en todos los grupos salvo los de 0-9 años y los de 40-49 años, para el 2004, esto confirmaría nuestra anterior observación. Necesariamente requerimos estudiar estas tendencias un número mayor de años.



Fuente: Oficina de Estadística DIRESA-ICA

Figura 2.16. Tasa de Muerte (x 10,000) Pisco. Según categoría de Edad. 2003-2004.

Asumiendo que algunas de las causas de muerte están asociadas a la contaminación del aire, y considerando que con las investigaciones realizadas hasta el momento, en la ciudad de Pisco, no podemos determinar el riesgo para los pobladores de Pisco, de acuerdo a los niveles de contaminación del aire en la ciudad. Es que presumimos que el riesgo puede ser similar al que presentan los habitantes de algunas ciudades de América, que podría considerarse un estándar.

Tabla 2.16. Cálculo de número de casos de muertes por PM_{10} que podrían ser evitadas Año 2003,2004. Provincia de Pisco.

GRUPO ETAREO		0-9	10-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60 a +	TOTAL
2003	MUERTES	43	7	17	24	40	36	232	399
	MUERTES EVITADAS	1.1	0.2	0.4	0.6	1	1	5.8	10.1
2004	MUERTES	43	13	32	32	33	38	255	446
	MUERTES EVITADAS	1.1	0.3	0.8	0.8	0.8	1	6.4	11.2

Fuente: Oficina de Estadística DIRESA-ICA

Asumiendo una probabilidad de 0.01 por cada 10 ug de PM_{10} que este por encima del valor considerado máximo permisible y teniendo en consideración

que el PM_{10} es el principal contaminante de Pisco, hemos calculado cuantos casos de muerte se podrían haber evitado por cada grupo etéreo, para un PM_{10} de 75 ug. Como se observa en la tabla 2.16 en general, se podrían haber evitado 10 muertes en el año 2003 y 11 el 2004. Probablemente los grupos etéreos en los que se hubiesen evitados mayor cantidad de muertos serían en el 0-9 años y los mayores de 60 años; esto se podría haber logrado llevando los valores de PM_{10} de 75 ug al nivel de los valores máximos permisibles.

Durante los días finales del año 2003 e inicios del 2004 el Ministerio de Salud a través de la Oficina General de Epidemiología efectuó un estudio denominado **“Estudio Epidemiológico de Línea Basal: Prevalencia de Enfermedades respiratorias en niños de 3 a 14 años asociadas a la Calidad del Aire en Pisco”** con el objeto de determinar los posibles impactos que se tendrían en la población Pisqueña debido a la presencia de contaminantes en el aire.

Lamentablemente el informe final de este trabajo hasta la fecha no es de conocimiento público, sólo se cuenta con **Resultados Preliminares que llegan a las siguientes conclusiones:**

- Se logró determinar asociación de riesgo entre asma bronquial y la presencia de un familiar o persona que fuma en la casa.
- En los casos de rinitis, se identificaron como factores de riesgo el uso de lámparas a querosene o vela como fuente de iluminación de la vivienda.
- Para el caso de faringitis se halló asociación de riesgo con pisos de tierra de la vivienda y el quemar basura en la misma casa o en la casa contigua.
- Respecto a la enfermedades respiratorias en general, se identificaron como factores de riesgo, el tener de 3 a 9 años de edad y a presencia de un familiar o persona que fuma en la vivienda.” (GESTA zonal Pisco, 2006).

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA CIENTIFICO

La historia de la contaminación aérea es tan antigua como el descubrimiento del fuego, su utilización en las cavernas fue probablemente la primera exposición general a la contaminación doméstica. Asimismo, la expansión de la Revolución Industrial está considerada como la primera exposición general a la polución ambiental externa.

Actualmente son ampliamente reconocidos los problemas de contaminación ambiental, en particular del aire, que dan lugar a la acumulación de riesgos para la salud y el bienestar de la población. Gran parte de esos problemas son consecuencia del caótico crecimiento urbano y de la industrialización, fenómenos que muchas veces no van acompañados de programas con el objetivo de proteger el ambiente. Desde hace varias décadas la contaminación del aire se ha asociado con ciertos efectos nocivos para la salud de las poblaciones.

Por esta razón, nuestro problema científico tiene planteadas las siguientes incógnitas: ¿Cuáles son las concentraciones en el aire de PM_{10} en la ciudad de Pisco?, ¿Qué fuentes las generan? ¿Qué cantidad de población está expuesta a diversas concentraciones de PM_{10} ? ¿Cómo se observaría la concentración en forma gráfica de toda la zona de estudio? ¿Cómo es el comportamiento de la concentración de este material particulado en la ciudad de Pisco con respecto a los alrededores? ¿Cuál es la distribución espacial de este contaminante en la zona de estudio? ¿Qué tendencia tiene las concentraciones del contaminante en áreas diferenciadas? ¿Qué relación existen entre la concentración de PM_{10} y otros parámetros meteorológicos?

Para contestar estas interrogantes es que se ha elaborado este documento.

4. MARCO TEORICO Y LEGAL

4.1. MARCO TEORICO

4.1.1. Contaminación Ambiental

“Con estas nuevas observaciones podemos ver que la contaminación del aire es mucho más que un problema local.” Sostuvo John Gille, científico principal del National Center for Atmospheric Research (Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas), en Boulder, Colorado, Estados Unidos. “Es un tema mundial”, agregó. Estas aseveraciones las realizó luego de revisar la información proveniente del Terra, estación de observación espacial de la NASA, que circula 16 veces el planeta Tierra cada 24 horas tomando muestras visuales de monóxido de carbono (CO) desde marzo hasta diciembre del 2000 correspondiente a la primera expedición. Las conclusiones más resaltantes de dicho estudio señalaron que la contaminación del aire observada en este estudio se genera en su mayoría: por incendios forestales en el oeste de Estados Unidos, las emisiones por la quema de combustibles fósiles para sistemas de calefacción durante el invierno en el Hemisferio Norte y por nubes de CO formadas tras incendios forestales y de arbustos en África y América del Sur que se extienden hasta incluso Australia durante la época seca. Terra detecta niveles de CO de 3-5 kilómetros sobre la superficie terrestre, donde interactúa con otros gases para formar ozono (Black, 2001).

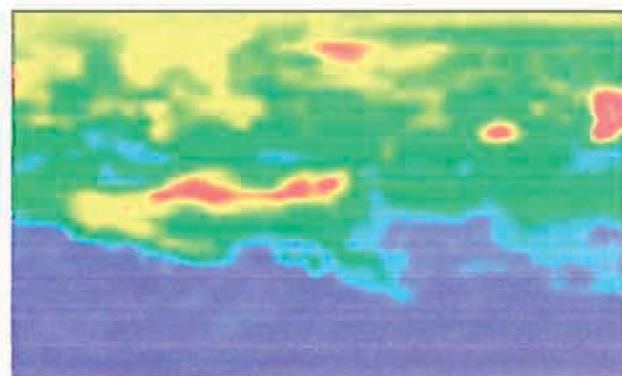


Figura 4.1. Fotografía tomada por Terra, las zonas rojas representan la mayor contaminación por CO.

La contaminación según la enciclopedia Wikipedia “es la introducción cualquiera de un contaminante; es decir cualquier sustancia o forma de energía con potencial para provocar daños irreversibles o no en el medio” (Wales & Sanger, 2001).

4.1.2. La Contaminación Atmosférica

En forma más directa a la atmósfera se define como “cualquier circunstancia que añadida o quitada de los normales constituyentes del aire, puede llegar a alterar sus propiedades físicas o químicas lo suficiente para ser detectado por los componentes del medio”. Están considerados en la definición como contaminantes a las sustancias que alcanzan concentraciones suficientes para producir un efecto medible en las personas, animales, vegetales o materiales (Ondarza, 1993).

4.1.2.1. La Atmósfera. Con el objetivo de entender la mecánica de contaminación atmosférica es necesario considerar los elementos en interacción.

- a. ***Estructura y Composición.*** La atmósfera es una masa gaseosa que forma la capa externa que envuelve a la Tierra, con un espesor cercano a los dos mil kilómetros. Su función principal radica en regular los procedimientos biológicos por actuar como regulador de la temperatura por medio de diferentes estratos heterogéneos que la conforman (Lomelí, Tamayo e Ibarra, 2000). Por causa de la compresión el 50% de la totalidad de la masa atmosférica se encuentra bajo los 5 Km, el 66 bajo los 10 y sobre los 60 Km de altitud se encuentra tan solo una milésima parte.

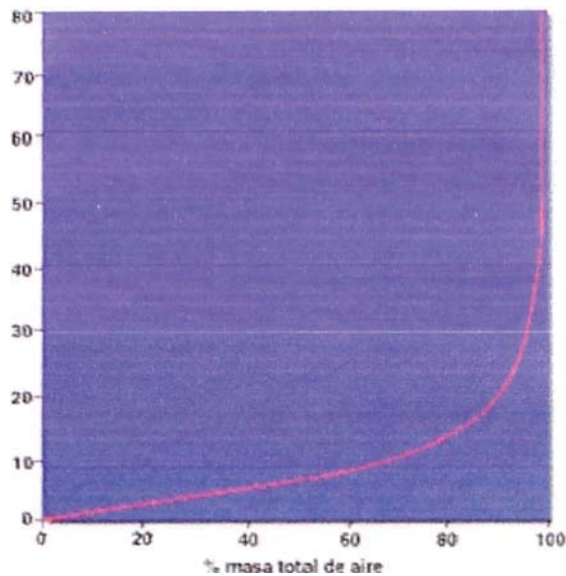


Figura 4.2. Porcentaje de la masa total por debajo de los 80 Km.

La estructura térmica está dirigida por los movimientos moleculares de los gases atmosféricos. La atmósfera no es un sistema cerrado, en ella se producen fenómenos que obedecen a los principios de conservación de masa y energía, momentum, leyes termodinámicas y dinámicas (Cuadrat, 1997).

La troposfera está a una altura entre los 8 y 12 Km sobre los polos y de 15 a 18 sobre la línea ecuatorial. Posee una gradiente vertical térmica. Una vez superados los límites de la troposfera la temperatura aumenta en forma gradual hasta alrededor de los 30 Km y luego con mayor rapidez hasta los 50. Esta capa con el mayor contenido de ozono se le denomina estratósfera. A partir de esta capa, se extiende la Mesosfera que llega hasta los 80 Km y alcanza temperaturas de -100°C . Luego varía hasta los 500°C cuando alcanza la altura de 500 Km, a esta zona se la denomina termósfera.

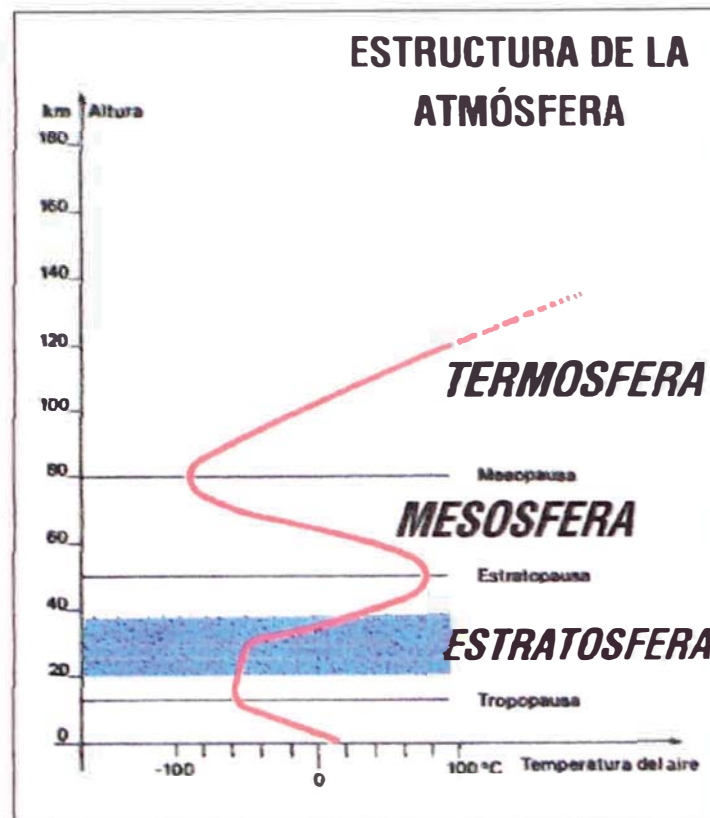


Figura 4.3. Estructura Térmica de la Atmósfera

Después de la última se extiende la exosfera que alcanza el nivel de los 2000 Km, considerado el límite de la atmósfera terrestre.

El aire atmosférico, extraído de cualquier capa, contiene en volumen: 78 % de nitrógeno, 21 % de oxígeno, 0.9 % de argón, 0.03% de bióxido de carbono y trazas de hidrógeno, neón, helio y ozono (Galdames, 2000). La masa total seca de la atmósfera se calcula en 5.13×10^{18} Kg (Cuadrat, 1997).

En una muestra de la baja atmósfera (cuya densidad de alrededor de 1.25 kilogramos por metro cúbico) se pueden encontrar las siguientes concentraciones de ciertos compuestos.

Tabla 4.1. Concentración de Compuestos en el Aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Compuesto	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Compuesto	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Dióxido de carbono	345-545	Formol	0-16
Metano	200-1600	Cloruros	1-5
Hidrógeno	36-90	Ioduros	0.05-0.5
Ozono	0-100	Plomo	2-20
Dióxido de azufre	0-50	Neón	1.8
Acido sulfhídrico	3-30	Helio	0.52
Monóxido de carbono	1-100	Kriptón	0.1
Oxido nitroso	0-6	Amoniaco	0-15
Dióxido de nitrógeno	0-6		

A esta mezcla es necesario añadir partículas de polvo, cenizas volcánicas, polen, productos industriales y algunos que pueden actuar como "núcleos higroscópicos" facilitando la formación de bruma o nubes. Las nubes están relacionadas con la regulación del clima a través de un mecanismo filtrante de las radiaciones.

El grado de contaminación ambiental está directamente relacionado con la dinámica de los ciclos biogeoquímico de compuestos que se desplazan en la biosfera, entre ellos: el carbono, oxígeno, nitrógeno, etc.

b. Aspectos Meteorológicos.

Los contaminantes emitidos por fuentes puntuales y distribuidas son transportados, dispersos, o concentrados por condiciones meteorológicas o topográficas. El ciclo de permanencia aérea se inicia con la emisión de contaminantes, seguidos por el transporte y difusión; completándose con la fijación sobre la vegetación, el ganado, los cuerpos de agua y otros arrastrados por las lluvias, introduciéndose, en algunos casos, nuevamente en la atmósfera por acción del viento. La dispersión de un contaminante en la atmósfera es el resultado de tres mecanismos dominantes: el movimiento medio general del aire que transporta el contaminante en dirección del viento, las fluctuaciones turbulentas que

dirigen al contaminante en distintas direcciones y la difusión de masa debido a los gradientes de concentración (Wark and Warner, 2005).

El viento, la humedad, la inversión térmica, las precipitaciones y otros pueden influir en el comportamiento de la contaminación.

El viento es el agente difusor, desplazando los contaminantes en función de la presión y temperatura. La capacidad de difusión del viento dependerá de la topografía del terreno o incluso la configuración de edificios en zonas urbanizadas. Asimismo, la humedad contribuye en la acumulación de humos y polvo. Por otro lado, el vapor tiende a reaccionar con aniones como el trióxido de azufre transformándolo en ácido sulfúrico, de igual forma procede para cloruros y fluoruros produciendo ácido clorhídrico y fluorhídrico respectivamente (Galdames, 2000).

- *El Movimiento de la Atmósfera.* Las variaciones de presión en la atmósfera suceden por causa de la altitud concentrándose en las zonas cercanas a la tierra, por otro lado la distribución heterogénea de la radiación solar sobre el suelo condiciona las alteraciones horizontales de la presión atmosférica. Considerando estas diferencias el viento busca equilibrar esta situación desplazándose de zonas de alta a baja presión actuando en respuesta a modificaciones climatológicas regionales formando: tomados, huracanes, etc. Otro comportamiento del viento es ocasionado por la inclinación y distancia de la Tierra con respecto al Sol en periodos de tiempo determinados. Asimismo la rotación de la Tierra influye sobre los vientos terrestres, “los vientos alisios (que se desplazan de los trópicos al ecuador), los contralisios (que se mueven de los trópicos hacia los polos) y los circumpolares (que circundan el polo norte y el polo sur) son producto del movimiento terrestre y la manera irregular como se distribuyen los continentes, los mares y los rayos solares sobre la superficie” (Lomelí, Tamayo e Ibarra, 2000).



Figura 4.4. Distribución y dirección de vientos en la Tierra.

- La Inversión Térmica.* Normalmente la temperatura desciende a razón de 0.64 a 1°C por 100 m en la troposfera, por encima disminuye a mayor ratio (Galdames, 2000). El fenómeno de inversión térmica ocurre cuando la baja densidad de gases, neblinas, humos, etc. presentes en la atmósfera permiten que el suelo se desprenda del calor obtenido por radiación con tal rapidez que no permite que las masas de aire superior se equilibren con las cercanas al suelo causando una gradiente positiva de temperatura con la altitud. Esta masa de aire aun caliente queda atrapada entre dos capas: la próxima al suelo que al ser fría da estabilidad térmica y evita la convección, transporte y difusión de gases, asimismo disminuye la velocidad de mezclado vertical; y la que posee temperaturas muy bajas, ubicada en la parte superior a la inversión térmica.

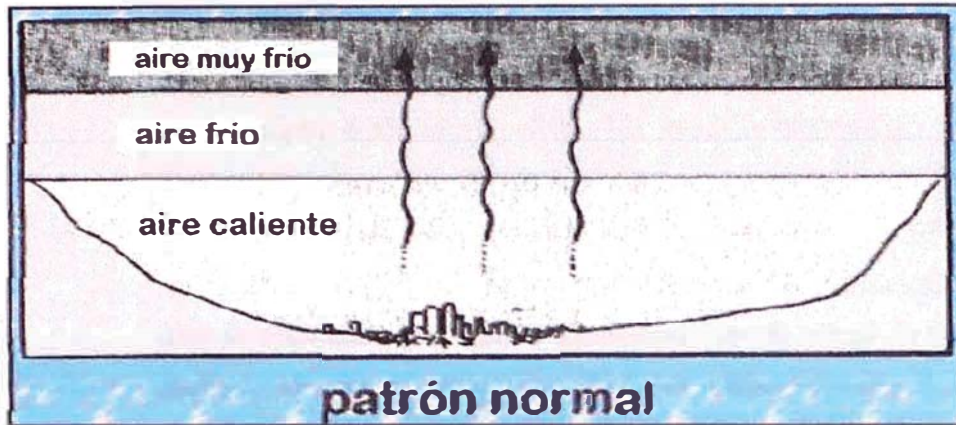


Figura 4.5. Dinámica de convección térmica normal.

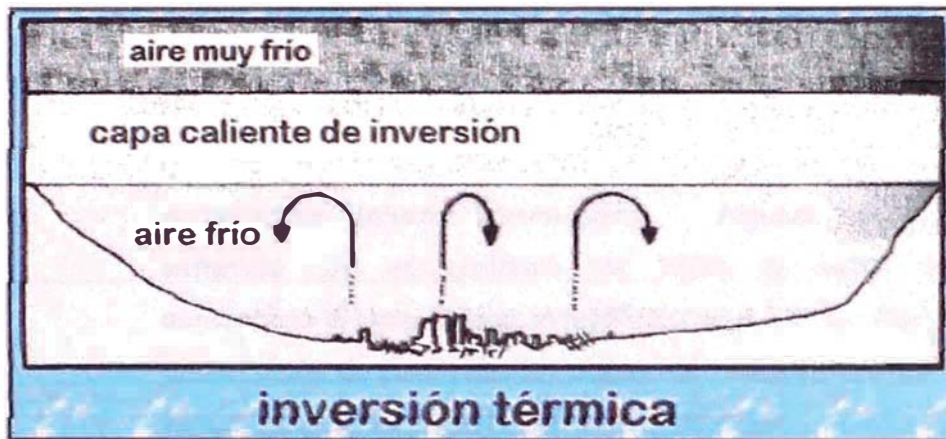


Figura 4.6. Inversión térmica y dirección de la dispersión de componentes en el aire.

Al producirse el fenómeno conocido como inversión térmica la dispersión de gases contaminantes encuentra mayor resistencia hacia zonas altas, concentrándose cerca al contacto humano.

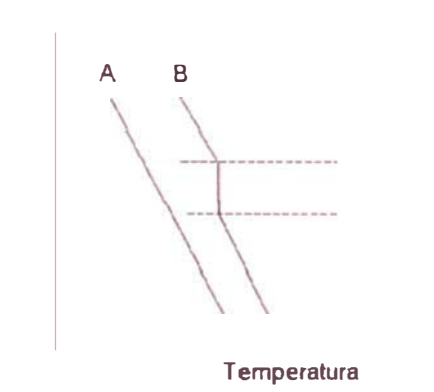


Figura 4.7. A, gradiente térmico normal; B, formación de inversión térmica

- *La Radiación Solar.* La radiación solar vertical en la frontera superior de la atmósfera (constante solar) tiene un valor aproximado $8.16 \text{ J/cm}^2 \cdot \text{min}$. La máxima intensidad tiene lugar entre longitudes de onda de 0.4 y $0.8 \mu\text{m}$. En términos generales el 42% de esta energía es absorbida por la alta atmósfera, reflejada al espacio por las nubes, vuelta a dispersar por la atmósfera, reflejada por la superficie terrestre o absorbida por el vapor de agua y las nubes. Un aproximado del 47% de la radiación solar es absorbida por las superficies acuáticas y terrestres, así también la Tierra emite radiaciones de onda larga con su máxima intensidad entre 4 y 12 m (cerca de región infrarroja). Gran parte de esta radiación es absorbida por el vapor de agua y el dióxido de carbono presentes en la atmósfera, esta acción permite que exista en calentamiento de la atmósfera dependiendo de la cantidad de los mencionados compuestos (efecto invernadero). Algunos estudiosos han señalado que un aumento del 100% de estos compuestos aumentaría la temperatura atmosférica de 2 a $4 \text{ }^\circ\text{C}$. Por otro lado la proliferación de partículas en suspensión causan el efecto contrario ya que no permiten que la tierra absorba calor.

El grado de insolación depende de muchos factores, entre ellos de *la variación del ángulo de incidencia solar sobre la Tierra durante las diferentes estaciones del año*. Además durante el día existen diferencias entre el grado de absorción de los rayos solares sobre *la Tierra, asimismo se presentarán variaciones dependiendo del tipo de cuerpo que recibe la radiación (rocas, suelo, agua, etc.)*.

Otro aspecto importante a mencionar es el enfriamiento suelo-agua que *se experimenta durante las horas del día y de la noche, siendo en el día la gradiente térmica de agua a suelo y en la noche viceversa*.

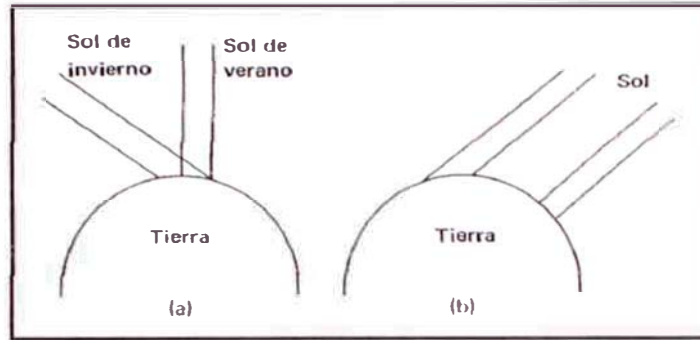


Figura 4.8. (a) Variación de la insolación con las diferentes estaciones. (b) Variación de la insolación con la situación geográfica.

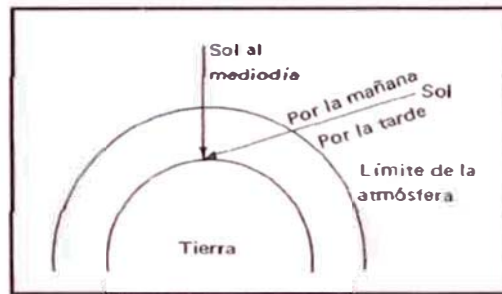


Figura 4.9. Variación con el ángulo de incidencia del espesor de la atmósfera atravesado por la radiación solar.

- La Circulación del Viento.* El calentamiento diferencial del aire origina gradientes de presión horizontales, los que a su vez conducen a un movimiento horizontal en la atmósfera. Las grandes masas de aire se mueven debido a la interacción térmica entre los polos y el ecuador, las otras son productos de variaciones locales de temperatura. Si la Tierra no girara, el aire tendería a fluir de regiones de alta presión a las de baja presión (de fría a caliente). No obstante la rotación de la Tierra varía esta suposición por motivo de la gradiente de presión (F_p), se debe también considerar la fuerza de Coriolis (F_{Cor}), originada por la rotación de la Tierra. La fuerza de Coriolis en este sistema global es una función de la velocidad de la porción de aire, así como de la latitud y de la velocidad angular de rotación de la Tierra. Es máxima en los polos

terrestres y mínima en el ecuador. La combinación de ambos incluyendo sus fuerzas ideales son conocidos como vientos geostroficós.

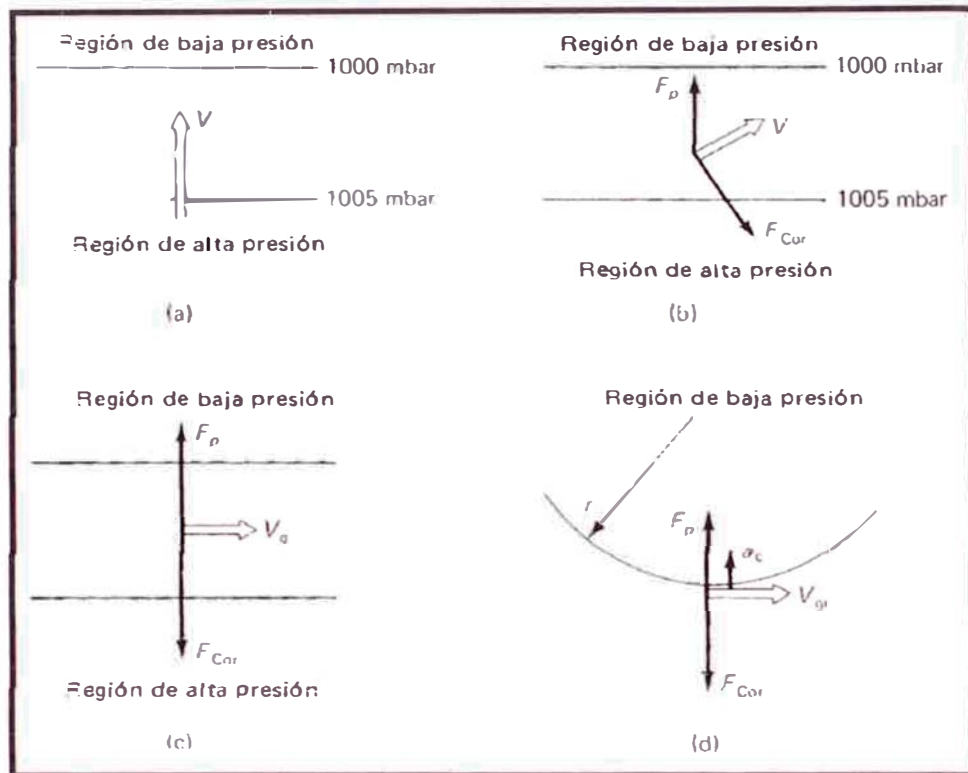


Figura 4.10. Efectos de las diversas fuerzas sobre la dirección del viento, en relación con las isobaras en la atmósfera. a) Fuerza sola del gradiente de presión, isobaras paralelas. b) Gradientes de presión o fuerzas de Coriolis, isobaras paralelas. c) Fuerzas de presión y Coriolis, en equilibrio; isobaras paralelas. d) Fuerzas de presión y Coriolis equilibradas por la aceleración centrípeta, isobara curva.

Otro tipo de viento es el gradiente, asociado con las isobaras curvas. A pesar de lo constante de la velocidad, en un recorrido circular existe también la aceleración centrípeta (a_c). Dichos recorridos curvos son particularmente evidentes alrededor de regiones de alta y baja presión. En el hemisferio norte el movimiento contrario a las agujas del reloj se llama un ciclón, el contrario se le llama anticiclón.

Los vientos geostróficos y de gradiente constituyen conceptos de interés en ausencia de una fuerza significativa de fricción. El retraso de la fuerza que incide sobre las capas de aire próximas al suelo son funciones de la rugosidad superficial del terreno. El efecto de esta fuerza de fricción, cuando se suma a las fuerzas de presión y de Coriolis, es hacer girar ligeramente el movimiento del aire hacia la derecha del viento gradiente. Es decir, el viento gira en un ligero ángulo hacia la región de baja presión. El resultado de la interacción de estas fuerzas es que la dirección del viento corta ahora las isobaras en dirección a la región de baja presión, y ya no es paralela a las isobaras.

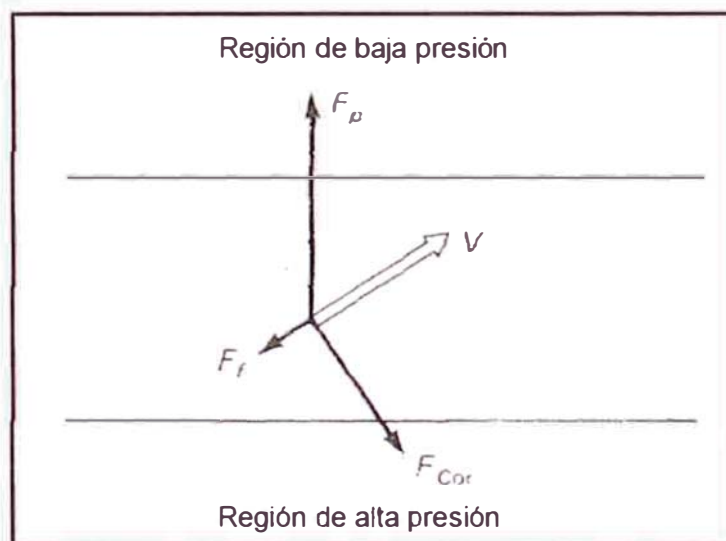


Figura 4.11. Efecto de la fuerza de fricción en la capa límite planetaria, sobre la dirección del viento.

Un viento constante puede existir cuando se incluye en el análisis la fuerza de fricción. Lo interesante es entender qué sucede cuando este fenómeno ocurre en zonas de alta o baja presión. En zonas de alta presión la velocidad del viento se dirige hacia fuera desde un círculo de radio r . Así, el flujo en las inmediaciones de un centro de alta presión debe pasar en una dirección a favor de las agujas del reloj y con un flujo neto hacia fuera. Como resultado, el aire debe introducir desde arriba del centro y dirigirlo hacia abajo a fin

de mantener el flujo hacia fuera. Este flujo descendente se llama asentamiento y constituye un posible inhibidor de la dispersión de los contaminantes en la atmósfera.

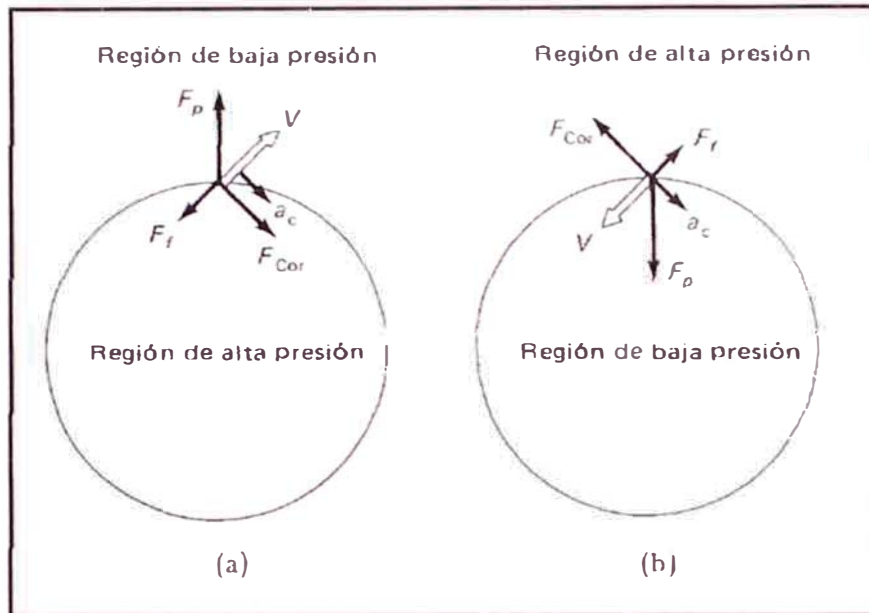


Figura 4.12. Equilibrios de fuerzas en la proximidad de las regiones de alta y baja presión. a) El flujo es hacia afuera y en sentido horario, alrededor de una región de alta presión. b) El flujo es hacia adentro y en sentido antihorario, alrededor de una región de baja presión.

Cuando se presenta esto en una zona de baja presión, el flujo cercano a un centro tiene dirección contraria a las manecillas de reloj. Un análisis adicional revela que el flujo espiral se dirige tanto hacia arriba como hacia dentro. De esta forma los contaminantes en la parte inferior de la atmósfera serán arrastrados hacia arriba y tenderán a la dispersión. La dispersión de contaminantes dependerá de la altura de emisión, debido a la fuerza de fricción próxima al suelo. La fuerza de fricción en la capa límite tiene un máximo cerca de la superficie de la Tierra y cae esencialmente a cero en la parte superior de la capa límite, donde predomina el viento geostrófico o el gradiente. Existen dos razones para este desplazamiento. En primer lugar, puede ser que en el modelo gráfico la dispersión de contaminantes liberados desde la parte

superior de una chimenea de gran altura no sea la verdadera. Por tanto, las mediciones de la dirección del viento realizadas cerca de la superficie del terreno pueden en cierta forma conducir a error en términos de la dirección actual que toman los contaminantes cuando salen de la chimenea. En la presencia de vientos fuertes ($> 6 \text{ m/s}$) el cambio de dirección de la velocidad con la altura resulta despreciable en los 100 m inferiores de la capa límite planetaria. Sin embargo, cuando la velocidad media del viento es menor a 6 m/s el cambio de dirección puede ser apreciable. Los valores de Φ en el rango de 5 a 15° ocurren sobre el océano, mientras que los valores de 25 a 45° son típicos en bajas velocidades sobre las masas del suelo.

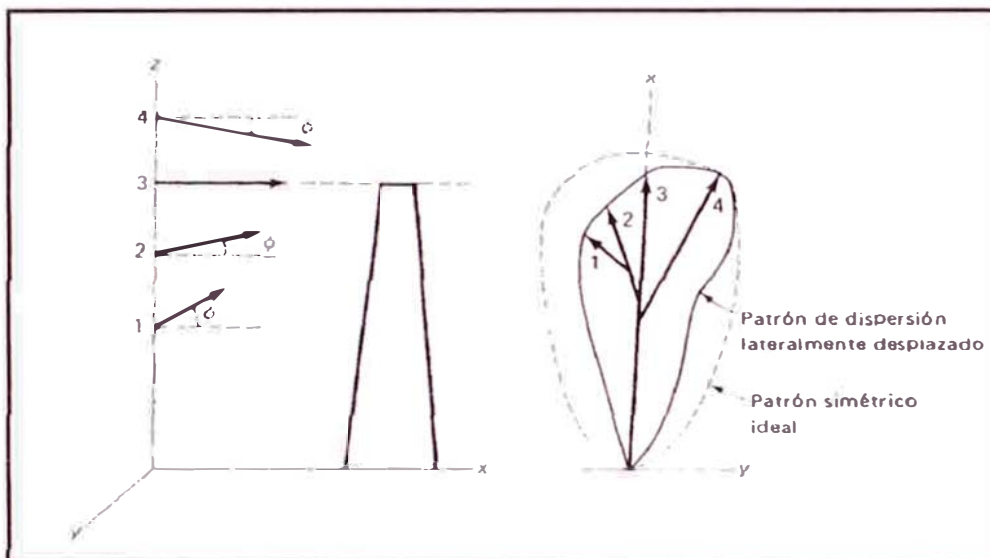


Figura 4.13. Efecto de las fuerzas de fricción en la capa límite planetaria, sobre la dirección del viento a diversas alturas.

Por otro lado, según los contaminantes son arrastrados en la dirección del viento, se dispersarán exteriormente en la dirección y , y verticalmente en la dirección z . Mientras los contaminantes se difunden verticalmente, encontrarán diferentes corrientes principales en la dirección del viento a diversas alturas. Así, el patrón de dispersión en la dirección del viento no será con frecuencia simétrico con respecto al eje de la dirección del viento en

la parte superior de la chimenea, sino que mostrará una tendencia a la oblicuidad.

- *La Tasa de Cambio.* Esta característica de estabilidad consiste en la tendencia de resistir el movimiento vertical o suprimir la turbulencia existente e es influyente en la medida de permitir dispersar los contaminantes que se emiten. Si un volumen de aire se desplaza hacia arriba, encontrará una presión menor y experimentará una expansión a menor temperatura. Esta expansión sucede con la rapidez necesaria como para que no haya una transferencia de calor. Esta expansión adiabática se determina considerando la atmósfera como una columna estacionaria de aire en un campo gravitacional y se aproxima al aire como gas ideal seco. Descartando efectos de fricción e inercia el equilibrio de fuerzas estáticas sobre un elemento diferencial de espesor dz conduce a:

$$dP = -\rho g dz$$

Donde P es la presión atmosférica, p es la densidad atmosférica, g es la aceleración local de la gravedad y z es la elevación. El signo negativo se da porque la altura z es positiva cuando se mide hacia arriba, mientras que la presión P , disminuye en esta dirección.

De la primera ley de la termodinámica para un sistema cerrado que contenga un gas ideal en proceso de experimentar un cambio de estado cuasiestático, se describe como:

$$dq = du + dw = du + Pdv$$

$$dq = (dh - Pdv) + Pdv = dh - \alpha dP$$

$$dq = C_p dT - \frac{1}{\rho} dP$$

Donde q es la cantidad de transferencia de calor y C_p es el calor específico a presión constante. Además para un proceso adiabático, $dq=0$, entonces la ecuación sería:

$$C_p dT = \frac{1}{\rho} dP$$

Sustituyendo y ordenando tendríamos:

$$\left(\frac{dT}{dz} \right)_{adia} = \frac{g}{c_p} = \frac{g(k-1)}{kR}$$

Donde k es la relación de los calores específicos, c_p/c_v . Suponiendo despreciando el cambio de g y c_p con la elevación, entonces el cambio de temperatura con la elevación en condiciones adiabáticas, será una constante, independiente de la elevación. Para los dos sistemas conocidos entonces tendremos:

$$\left(\frac{dT}{dz} \right)_{adiaseca} = -0.0098^\circ \text{C}/m = -0.0054^\circ \text{F}/pie$$

A su vez es necesario repetir que la tasa de cambio es un valor negativo del gradiente de temperatura en la atmósfera y se le asigna el símbolo Γ y será:

$$\Gamma = \left(\frac{-dT}{dz} \right)_{adiaseca} \cong 1^\circ \text{C}/100m = 5.4^\circ \text{F}/1000pie$$

El estudio tasa de cambio adiabática seca es necesario para entender el grado de dispersión de los contaminantes. Una comparación de Γ con la tasa actual de cambio (ambiental) en la atmósfera baja indica en grado extremo su estabilidad. El grado de dispersión es una medida de la capacidad de la atmósfera para

dispersar los contaminantes emitidos dentro de ella. Es necesario llegar a una convención de valores por lo que se ha adoptado como promedio en las latitudes medias, la temperatura disminuye linealmente con la elevación, hasta que se llega a aproximadamente 35 300 pies. Los promedios de temperatura son de 288°K al nivel del mar y de 393°K a 35 300 pies (10.8 Km). Por tanto la gradiente normal de temperatura es:

$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_{normal} = (393 - 519)^{\circ}F / 35500\text{pie} = -0.00357^{\circ}F / \text{pie} = -0.0066^{\circ}C / m$$

La tasa normal de cambio adiabática saturada (húmeda) de la atmósfera es diferente al valor antes hallado. El vapor de agua en el aire se condensará cuando esta pase a una mayor elevación.

Este proceso de condensación libera del agua la entalpia de condensación, y esta energía tiende a elevar la temperatura de la mezcla. Asimismo, la expansión ascendente hacia una presión menor tiende a disminuir la temperatura. Las variaciones de en el cambio de temperatura con la elevación de este sistema se puede corroborar por medio de un balance de energía efectuado sobre una porción de aire saturado con vapor de agua. Teniendo a ω como la relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco por volumen de aire atmosférico. Para un cambio diferencial $d\omega$ del agua a la fase líquida, según asciende la porción del aire, la liberación de energía a la fase de vapor es $h_{gr}d\omega$ en términos de la energía por masa unitaria de aire seco. En la fase de vapor esto equivale a una adición de calor de lo que tenemos:

$$dq = c_p dT - \frac{1}{\rho} dP \rightarrow -h_{fg} d\omega = c_p dT + g dz$$

De lo que tendríamos ordenando:

$$-\left(\frac{dT}{dz}\right)_{sat} = \frac{g}{c_p} + \frac{h_{fg}}{c_p} \frac{d\omega}{dz}$$

Se observa que $d\omega/dz$ es negativo para una porción de aire ascendente, ya que el vapor de agua está en proceso de condensación. La suma de los términos de la derecha es menos positiva que para el caso del aire seco. Es decir, el efecto global es un descenso de la temperatura con un aumento en la elevación, pero nunca tanto como el adiabático seco. Debido al hecho de que la presión del vapor de agua aumenta notablemente con la temperatura, la relación $d\omega/dz$ es una función de la temperatura. La tasa de cambio saturada por una porción adiabática de aire es aproximadamente $3.4^\circ\text{F}/1000$ pies (Wark y Wamer, 2005).

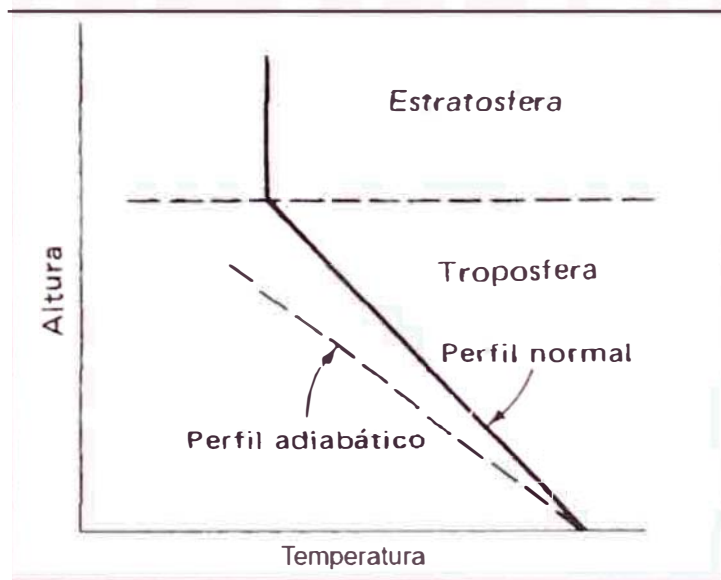


Figura 4.14. Perfil de temperatura de la atmósfera normal, comparada con el gradiente de temperatura adiabática.

- *Las Condiciones de Estabilidad.* Es de importancia conocer el grado de estabilidad para entender la capacidad de dispersión que tiene la atmósfera con respecto a los contaminantes. La atmósfera estable es un término referido a aquella que no muestra mezclado o movimientos verticales en exceso. Por ello los contaminantes emitidos cerca del suelo tienden a permanecer allí. El hecho de

que exista mezclado a una escala significativa depende en primer lugar del gradiente de temperatura y en segundo de la turbulencia mecánica debido a la acción cortante del viento. La posibilidad que ocurra mezclado se puede determinar por comparación del gradiente actual de temperatura o tasa de cambio con la tasa de cambio adiabática. Cuando la tasa de cambio ambiental es mayor que la tasa de cambio adiabática seca, se dice que la atmósfera es superadiabática, es decir, que la gradiente de temperatura existente es mayor que el gradiente de temperatura adiabático seco. El primer recuadro muestra un caso superadiabático, lo que explica que cuando una cantidad de aire a la temperatura A es transportado hacia arriba (debido entre otras causas a la fluctuación de la turbulencia) su expansión se asemeja a la adiabática seca ya que la tasa de transferencia de calor a través del límite será lenta comparada con su tasa de movimiento vertical. Así, su estado final podría ser la posición B, que se encuentra a lo largo de la línea adiabática seca. La temperatura en el punto B es mayor al aire circundante a esa altura, representado por el estado C, que se encuentra a lo largo de la línea de gradiente de temperatura ambiental. Esta pequeña porción de aire es entonces menos densa que el aire que la rodea (la misma presión pero mayor temperatura) y tiende a continuar su movimiento ascendente. Si la misma cantidad de aire se dispersara hacia abajo, experimentará una compresión adiabática a una temperatura F. Debido a su mayor densidad, la pequeña porción de aire continuará su movimiento descendente. La condición que se acaba de describir es inestable ya que las perturbaciones en la dirección vertical tiende a ser aumentada. Por tanto, cualquier tipo de atmósfera que tenga una tasa de cambio superadiabática es inestable.

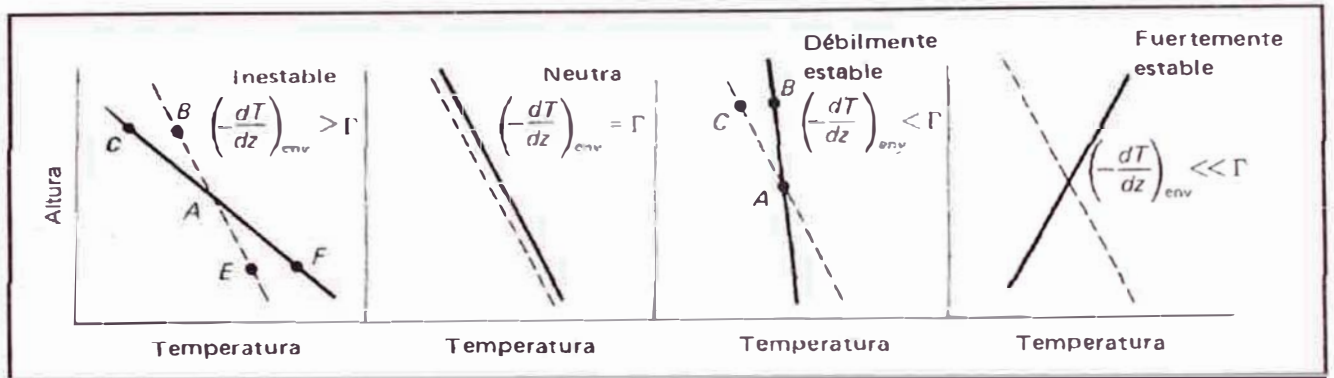


Figura 4.15. Tasa de cambio relacionada con la estabilidad atmosférica (tasa de cambio ambiental-, tasa de cambio adiabática --)

Cuando ambas tasas son similares (ver fig. 4.15) se entiende que la atmósfera tiene una estabilidad neutral. Cualquier porción de aire arrastrado hacia arriba o abajo tendrá la misma temperatura que la masa circundante. Así, no existe tendencia alguna para un movimiento vertical debido a variaciones térmicas, la porción de aire permanece en su línea de desplazamiento. Se dice entonces que, si la tasa de cambio ambiental es menor que la tasa de cambio adiabática seca, lo que supone una mayor gradiente de temperatura, la atmósfera es entonces subadiabática. Aplicando el argumento del otro caso, que una atmósfera subadiabática es estable. En otras palabras, cualquier porción de aire súbitamente desplazado en forma vertical tendrá la tendencia a regresar a su posición original. Así, un elemento de aire desplazado de la posición A a la C, como se muestra en la fig. 4.15 será más densa que el ambiente en B. Por tanto, tendrá la tendencia de caer nuevamente a su altura original.

La estabilidad atmosférica es caracterizada por la frecuencia de la *gradiente de temperatura potencial del aire seco*. Esta se define como la temperatura que tendría un volumen de aire si se llevara por un proceso adiabático de su presión existente P a una temperatura normal P_0 de 1000 mbar. Esto se ilustra mejor en la fig. 4.16 por el recorrido A-B y definida por la ecuación

$$\phi = T \left(\frac{P_o}{P} \right)^{(k-1)/k} = T \left(\frac{1000}{P} \right)^{0.288}$$

Aquí k es la relación entre los calores específicos y 0.288 es el exponente para el aire atmosférico seco en la atmósfera baja. P debe estar en milibares y T en R° o °K.

El gradiente de la temperatura potencial se puede expresar en términos del gradiente de la temperatura ambiental y la tasa de cambio adiabática seca. La diferenciación logarítmica de la ecuación anterior con respecto a la elevación z dará:

$$\frac{1}{\theta} \frac{d\theta}{dz} = \frac{1}{T} \left(\frac{dT}{dz} \right)_{amb} - \frac{k-1}{k} \left(\frac{1}{P} \right) \frac{dP}{dz}$$

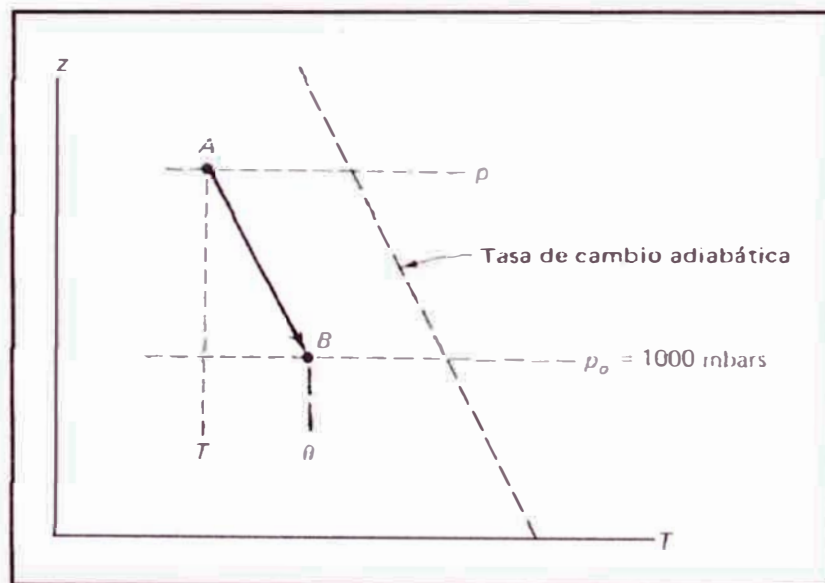


Figura 4.16. El proceso adiabático, por el que se define la temperatura potencial, ϕ

También se sabe que

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g$$

Además la ecuación de gases ideales dice:

$$P = \rho R T$$

Al sustituir la ecuación de presión con la anterior a esta se obtiene,

$$\frac{1}{\theta} \frac{d\theta}{dz} = \frac{1}{T} \left[\left(\frac{dT}{dz} \right)_{amb} + \frac{k-1}{k} \left(\frac{g}{R} \right) \right]$$

Para un gas ideal,

$$\left(\frac{k-1}{k} \right) \frac{1}{R} = \frac{1}{c_p}$$

Por tanto,

$$\frac{1}{\theta} \frac{d\theta}{dz} = \frac{1}{T} \left[\left(\frac{dT}{dz} \right)_{amb} + \frac{g}{c_p} \right]$$

Así, el segundo término del lado derecho es la tasa de cambio adiabática seca, entonces se puede escribir como;

$$\frac{1}{\theta} \frac{d\theta}{dz} = \frac{1}{T} \left[\left(\frac{dT}{dz} \right)_{amb} + \Gamma \right]$$

Resolviendo la ecuación anterior para $d\theta/dT$ y asumiendo para pequeños cambios de p que $\theta \approx T$ se determina que:

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta z} = \left(\frac{\Delta T}{\Delta z} \right)_{amb} + \Gamma = \left(\frac{\Delta T}{\Delta z} \right)_{amb} - \left(\frac{\Delta T}{\Delta z} \right)_{adia}$$

Donde $\Delta\theta/\Delta z$ es el gradiente de temperatura potencial. También se observa la diferencia entre los gradientes ambientales y adiabáticos. Cuando la temperatura disminuye con la altura como en la atmósfera normal, $(dT/dz)_{amb}$ será negativo. Cuando $(dT/dz)_{amb}$ es más negativo que el gradiente de temperatura adiabática seca, $\Delta\theta/\Delta z$ será negativo o menor que cero. Así, un gradiente negativo de temperatura potencial está asociado con una atmósfera inestable (superadiabática). En similar forma, cuando $(dT/dz)_{amb}$ es menos negativo (o hasta positivo), cuando se le compara con el gradiente de temperatura adiabática seca (condición subadiabática), el gradiente de temperatura potencial es positivo y la atmósfera es estable. Cuando $\Delta\theta/\Delta z$ es cero la atmósfera es neutral.

Cuando la temperatura aumenta con la altura la tasa de cambio es negativa y la condición atmosférica se conoce como una *inversión* (como antes de ha explicado en el documento). Es una condición de gran estabilidad, y se caracteriza por un gradiente positivo de temperatura potencial relativamente grande. El efecto de la inversión es reducir la dispersión vertical de los contaminantes y así aumentar la concentración localmente. De los varios tipos de inversiones, los dos más usuales son los formados por el descenso de una capa de aire dentro de una masa de aire a alta presión, y las formadas por la radiación nocturna de la superficie del suelo a la atmósfera local. El primer tipo es conocido como *inversión por asentamiento*. Es una capa de inversión cuya base está a cierta distancia de la superficie terrestre y está formada por la compresión adiabática y el calentamiento de una capa de aire según descende a alturas inferiores en la región de un centro de alta presión. Para el descenso de una capa de aire se comporta como gas ideal, se muestra:

$$\left(\frac{dT}{dP}\right)_{adfa} = \frac{1}{c_p \rho}$$

Así la variación de temperatura en cualquier posición dentro de la capa que se hunde, con respecto a la presión, es una función del calor específico a presión constante y de la densidad del gas en dicha posición. El valor de c_p para el aire se considera como constante un amplio margen de temperaturas. No así, la densidad del aire es menor en la parte superior que en la inferior, debido al cambio de la presión barométrica con la altura. Como se ve para la capa de aire:

$$\left(\frac{dT}{dP}\right)_{\text{arriba}} > \left(\frac{dT}{dP}\right)_{\text{abajo}}$$

La parte superior de la capa se calienta con mayor rapidez que la parte inferior de la misma. Si el asentamiento (cambio general) de la capa persiste durante un tiempo suficiente, se creará un gradiente positivo dentro de la capa. Este gradiente cumple la característica de una capa de inversión. De esta forma, la masa de aire que se asienta actúa como una gigantesca tapa sobre la atmósfera que está debajo.

Se nota también, que las inversiones por asentamiento ocurren sobre las fuentes de emisión, por tanto no contribuyen a los problemas de contaminación a corto plazo; por otro lado este tipo de inversión puede persistir durante varios días y contribuir a la acumulación de contaminantes, como se han registrados en zonas metropolitanas por este tipo de inversión.

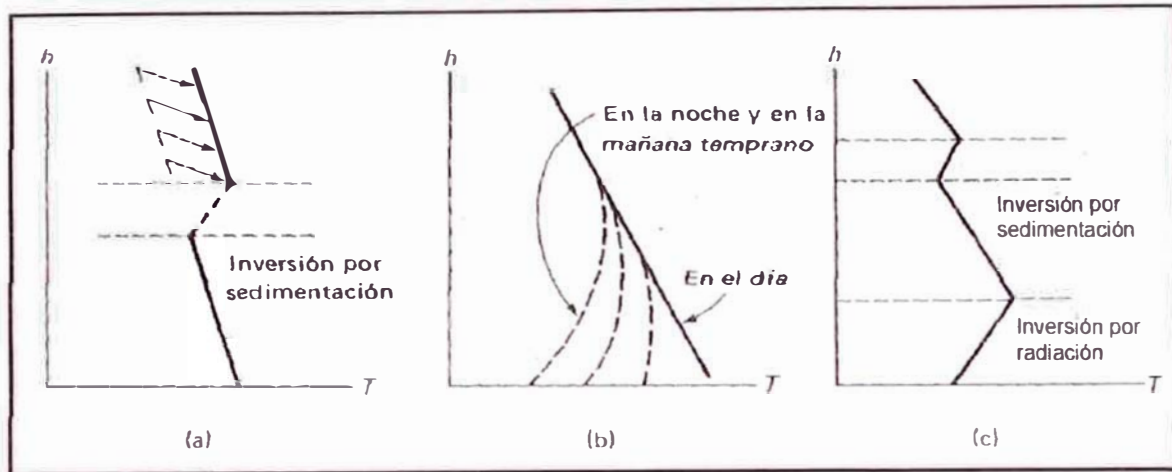


Figura 4.17. Ilustraciones de a) inversión por asentamiento, b) inversión por radiación y c) combinación de inversiones por asentamiento y por radiación.

El segundo tipo de inversión usual es el de radiación. Las capas superficiales de la atmósfera reciben durante el día calor por conducción, convección radiación de la superficie del terreno, de esta forma se calientan. De esto resulta un perfil de temperatura en la atmósfera baja que está representado por un gradiente negativo de temperatura. Si se tiene una noche despejada, la superficie del suelo irradia calor y se enfría rápidamente. Las capas de aire adyacentes a la superficie terrestre se enfrían a una temperatura por debajo de las capas de aire a mayores elevaciones. Por tanto, el perfil diurno de la temperatura se invierte, y una capa estable de inversión cubre entonces la atmósfera baja, por encima de la superficie terrestre. Este tipo suele presentarse momentos antes del amanecer y durante periodos de cielos despejados y vientos ligeros. Se deshace cuando el sol de la mañana calienta el suelo y restablece las corrientes de aire caliente ascendente. La fig. 4.18 ilustra la desviación diurna entre las masas de aire inestables y estables cerca de la superficie terrestre. Desde las 6 horas hasta las 17 se observa el gradiente de temperatura negativo. No obstante, al acercarse la puesta del sol, el gradiente se invierte y permanece así hasta poco antes del alba. La altura de las inversiones son frecuentemente menor que 500 m. Estas son suprimidas por cubierta de nubes y por fuertes vientos. La primera

impide hasta cierto punto las p'erdidas por radiaci'ón de la superficie terrestre, y por tanto el intenso enfriamiento de la atmosfera cerca de la superficie. Los fuertes vientos tienden a suavizar cualquier gradiente adverso de temperatura formado a causa de medios térmicos. Las inversiones por radiación tienene mayor importancia en los problemas de contaminación del arie debido a que ocurrendo rde la capa de la atmósfera que contiene las fuentes de contaminantes. Así también, debido a que este tipo de inversión courre con mayor probabilidad en las noches claras y sin viento, lo cual disminuye la posibilidad de lavado por lluvias o movimientos húmedos laterales.

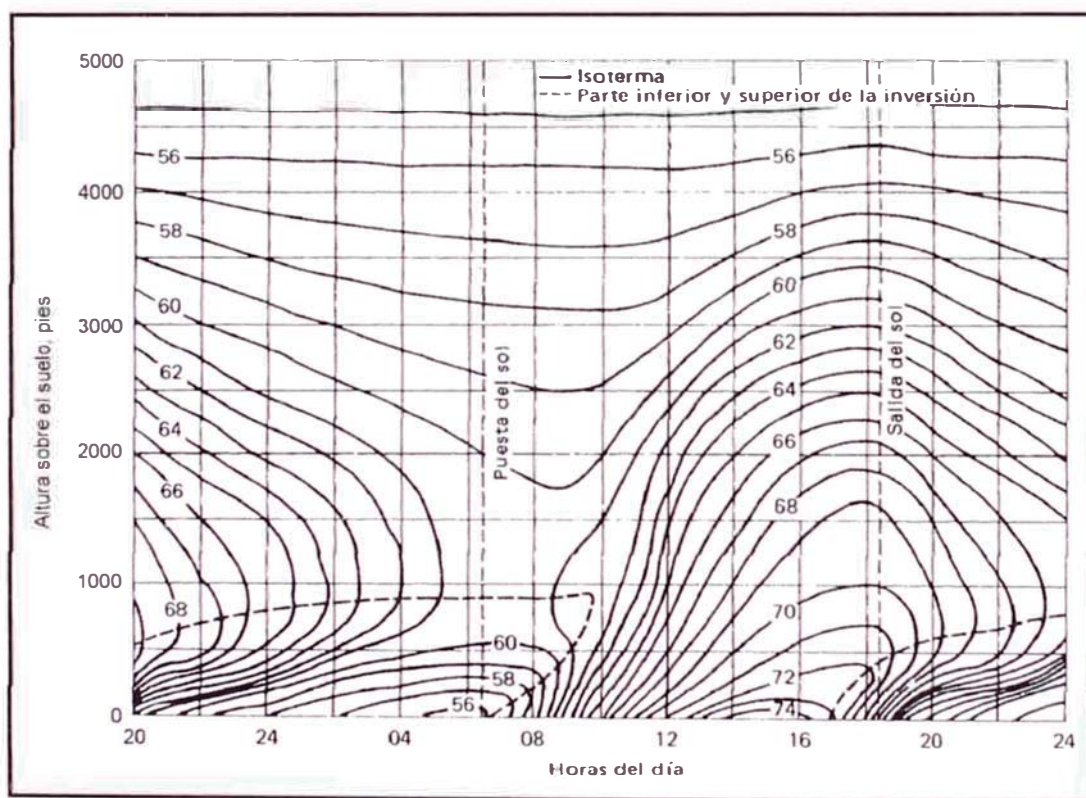


Figura 4.18. Sección transversal del tiempo para la temperatura promedio (°F) hasta una altura de 5000 pies, setiembre y octubre de 1950, Oak Ridge Tennessee. (Fuente: U. S. Weather Bureau (1953). *Meteorological Survey of the Oak Ridge Area*. Report ORO-99. Tennessee, Estados Unidos: AEC).

También es posible que ambos tipos de inversión se muestren al mismo tiempo en la atmósfera, este fenómeno conduce al llamado atrapamiento de una pluma de chimenea. La intensidad y duración de una inversión está afectada por la estación del año. La mayor cantidad de inversiones ocurren en otoño e invierno. Otro aspecto que se considera en estos fenómenos es la topografía del lugar, el aire frío fluye hacia abajo por la falda de una montaña y puede ser atrapado en el valle por el aire caliente que está sobre él. Hasta que el sol no se posicioné directamente en la parte superior, existe la posibilidad que el aire del valle no se caliente lo suficiente para causar la ruptura de la inversión.

Finalmente existen otros dos tipos de inversiones. Una está relacionada con las brisas marinas. Al calentarse en la mañana el aire que se encuentra por encima de una masa terrestre, se induce el flujo de aire más frío hacia la tierra desde un cuerpo de agua. Esto da por resultado aire más caliente arriba y una capa más fría a lo largo de la superficie, es decir, una condición de inversión. La otra condición de inversión está asociada como el paso de un frente cálido a través de una gran masa de terreno. Con frecuencia el frente cálido desplazará el aire más frío y denso que lo precede, con lo que se crea una inversión localizada de temperatura. El paso de un frente frío dentro y por debajo de una región cálida delante del mismo conducirá a una condición similar.

- *El Perfil de Velocidad del Viento.* Los efectos de fricción sobre la capa de aire cercana a la superficie hacen que el movimiento del aire sea más lento. La topografía del terreno produce diferentes gradientes de velocidad del viento en dirección vertical. La capa de aire (capa límite planetaria) se extiende desde unos cientos de metros hasta varios kilómetros sobre la superficie del suelo. Las condiciones inestables de una región pueden actuar como dispersores de los contaminantes, debido a las turbulencias, no

obstante, pueden darse casos de concentraciones instantáneas superiores a las que ocurrirían en una atmósfera estable.

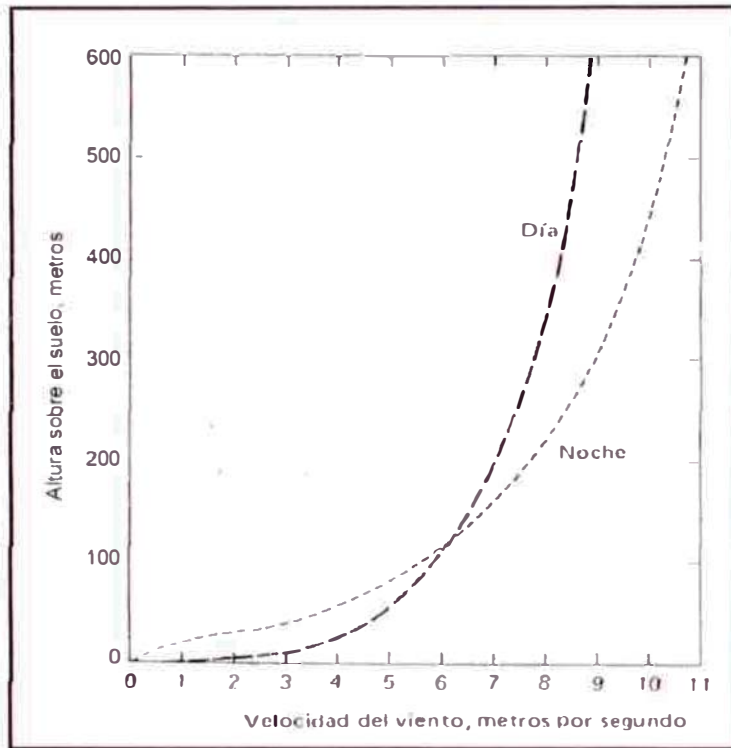


Figura 4.19. Cambio de perfil de velocidad del viento con la estabilidad. (Fuente: Turner, D. (1969). *Workbook for Atmospheric Dispersion Estimates*. D. C., USA: HEW)

En la fig. 4.19 se muestran perfiles típicos de velocidades durante el día y la noche. Se observa que el nocturno es más pronunciado. Además para este caso el viento se estabiliza cerca de los 600 m. Sobre esta altura la rugosidad es despreciable y el viento se comporta como el del viento gradiente. En la fig. 4.20 se aprecia el efecto de la rugosidad sobre la variación de la velocidad del viento. Por ello la altura para las mediciones de viento es de 10 m. Por otro lado también se ha intentado hallar una expresión matemática para determinar la velocidad del viento a otras alturas, pero no se ha encontrado una satisfactoria, por lo que se ha recurrido a la ley de exponenciales de Deacon, que es de utilidad para las capas límites de hasta varios cientos de metros de profundidad:

$$\frac{\mu}{\mu_1} = \left(\frac{z}{z_1} \right)^p$$

Donde μ es la velocidad del viento a la altura z , μ_1 es la velocidad del viento a la altura z_1 y p es el exponente positivo entre 0 y 1. Cuando la tasa de cambio ambiental es similar al valor adiabático y el suelo es llano con poca cubierta superficial, el valor de p debe ser 1/7. El espesor de la capa límite y la velocidad del viento es una función de la estabilidad atmosférica. Por lo que p debe variar según las características de este factor. Sutton ha inferido que p puede relacionar con parámetro n que está en función de la estabilidad atmosférica, así

$$p = \frac{n}{2-n}$$

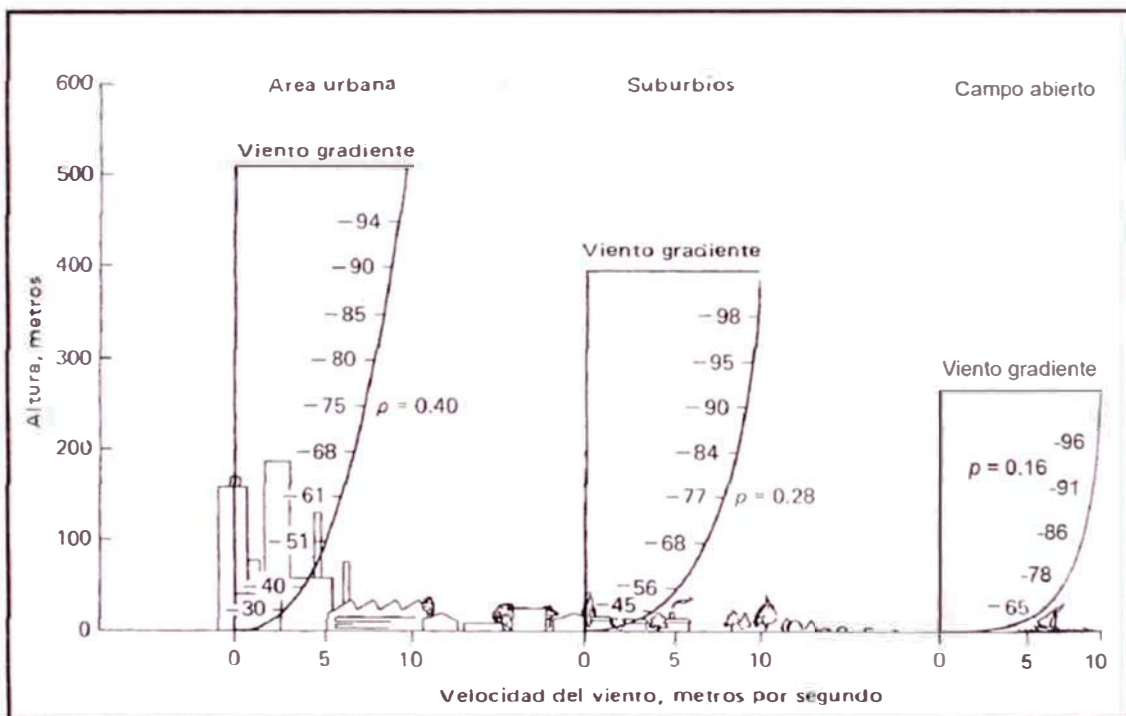


Figura 4.20. Efecto de la rugosidad del terreno sobre el perfil de velocidad del viento. Los valores a lo largo de las curvas representan porcentajes del valor de la gradiente del viento. (Fuente: Turner, D., 1969. *Workbook for Atmospheric Dispersion Estimates*. D.C., USA: HEW.

Los valores de n se pueden apreciar en la tabla 4.2. Con respecto a p se ha visto razonable el valor de 0.4 para áreas urbanizadas; 0.28 para áreas densamente boscosas, ciudades y suburbios; finalmente 0.16 para terrenos llanos y abiertos, lagos y mares. Otros autores opinan que para alturas de hasta cientos de pies, una relación logarítmica del tipo $u=c\log z$ es más representativa de la ley de exponentes, para terrenos abiertos.

Tabla 4.2. Relación entre el parámetro de estabilidad n y la condición de estabilidad de la atmósfera.

Condición de estabilidad	n
Tasa de cambio grande	0.20
Tasa de cambio pequeña o cero	0.25
Inversión moderada	0.33
Inversión grande	0.50

Tabla 4.3. Relación entre la diferencia de temperatura y el parámetro p para las capas de aire con un espesor de 5 a 400 pies, donde $T = T_{400} - T_5$

ΔT ($^{\circ}F$)	p	ΔT ($^{\circ}F$)	p
-4 a -2	0.145	2 a 4	0.44
-2.5 a -1.5	0.17	4 a 6	0.53
-2 a 0	0.15	6 a 8	0.63
-1 a 1	0.29	8 a 10	0.72
0 a 2	0.32	10 a 12	0.77

La dispersión de los contaminantes en la atmósfera es una función definida de la velocidad promedio y la altura de fuente de emisión. De esto se deslinda que para efectos de control de contaminantes se debe tener en claro la velocidad del viento, la elevación, la naturaleza del terreno circundante y la estabilidad de la atmósfera.

- *La Altura Máxima de Mezclado.* El mezclado convectivo y turbulento permite la dispersión de contaminantes de forma óptima en la atmósfera baja. La altura a la que ocurre el fenómeno varía con respecto a la estación y a la topografía. El alcance vertical permitirá que la zona de contacto para la dilución sea mayor, los efectos de flotación térmica determinan la altura de la capa convectiva de mezclado, conocida como altura máxima de mezclado (AMM). Con regularidad se conocen los AMM de un mes por lo que se realiza un obtiene un altura máxima de promedio de mezclado (AMPM).

Quando una porción de aire se calienta por radiación solar en la superficie del suelo, su temperatura se eleva más que el circundante adquiriendo flotabilidad. La aceleración de flotación debida a esta diferencia de temperatura, se puede deducir de consideraciones básicas. Para un fluido en equilibrio en la atmósfera, la ecuación dominante es:

$$dP = -\rho g dz$$

En el caso que una porción de aire se acelera. La ecuación dominante para esta porción es igual, si se exceptúa que contiene un término de inercia para el efecto de la aceleración. Entonces para la porción de aire tendremos,

$$\frac{dV}{dt} = -g - \frac{1}{\rho'} \left(\frac{dP}{dz} \right)$$

Donde dV/dt es la aceleración, ρ' es la densidad del aire calentado y ρ es la densidad del aire alrededor. Sustituyendo se halla,

$$\frac{dV}{dt} = \left(\frac{\rho - \rho'}{\rho'} \right) g$$

Y con la fórmula de gases ideales se tiene:

$$P = \rho RT = \rho' RT'$$

Al sustituir ρ y ρ' en la expresión dV/dt con el uso de las ecuaciones de los gases ideales se obtiene:

$$\frac{dV}{dt} = \left(\frac{T' - T}{T} \right) g = \text{aceleración de flotación}$$

Según la última ecuación entonces se puede asegurar que una masa de aire caliente tenderá a subir hasta igualar la temperatura del aire alrededor, esa altura define el límite de la capa de mezclado. Este comportamiento está representado en la fig. 4.21(a), donde el subíndice o sobre los símbolos de la temperatura representan el valor a nivel del suelo, y su perfil de temperatura está representado por la línea continua, marcada $(dT/dz)_{amb}$. La porción de aire se calienta por radiación solar hasta T' a nivel del suelo. Se expande hacia arriba a lo largo de una tasa de cambio adiabática seca, Γ , mostrada como discontinua en la figura. La intersección es a altura máxima de mezclado, AMM. En aire muy estable, el gradiente general de la temperatura atmosférica toma la forma que se muestra en la figura 4.21(b). En dichas condiciones la AMM es más baja que en el caso mostrado en la fig. 4.21(a). La c muestra la posición de la AMM cuando está presente una elevada capa de inversión.

Esta AMM se determina realizando mediciones por radio sonda, enviando un globo al espacio y los valores tomados a varias alturas se transmiten por radio a tierra. Estos datos se trazan contra la altura. Una tasa de temperatura adiabática seca, la que se inicia a la temperatura superficial máxima normal, se traza también en este

gráfico. La altura a la que la tasa adiabática seca corta a las mediciones de radiosonda se toma como AMM.

Los valores de AMM son menores durante la noche y aumentan durante las horas del día. Durante una fuerte inversión por la noche, dicho valor puede ser cero, mientras que los valores encima de los 2000 m pueden ser normales durante el día. La AMM es en promedio mínima en el invierno y máxima a principios de verano. Cuando el valor de la AMM es menor que 1500 m se dice que los episodios de contaminación pueden ser más extensos.

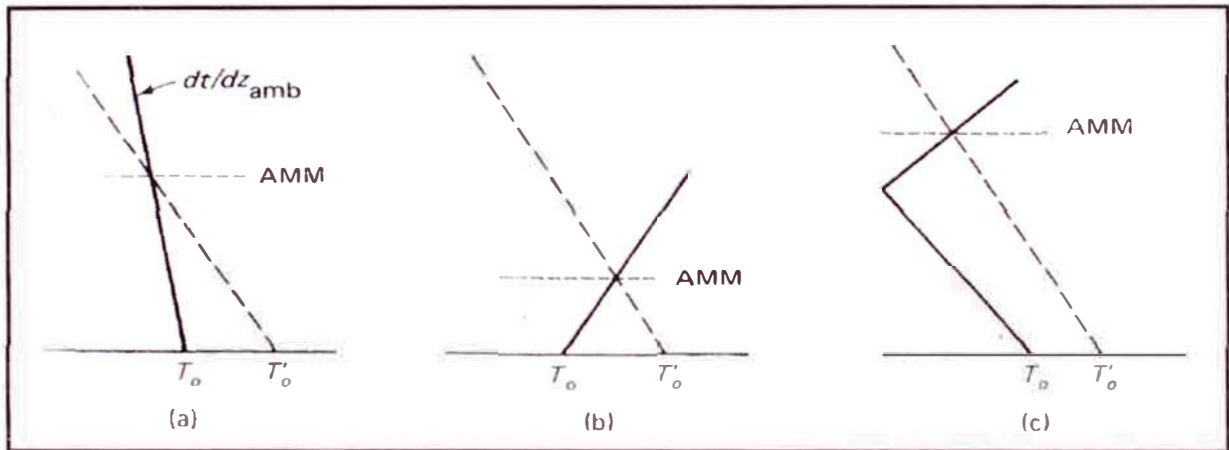


Figura 4. 21. Establecimiento de la altura máxima de mezclado (AMM) en diversas condiciones atmosféricas (perfil adiabático—, perfil ambiental –)

- *La Rosa de los Vientos.* Para estimar la dispersión de los contaminantes en la atmósfera es necesario conocer frecuencia de distribución del viento así como la velocidad. Estos datos varían con respecto a la ubicación de la zona a estudiar así como en el espacio de tiempo. La tabla 4.4 representa una lista con valores hipotéticos de la velocidad y dirección del viento para un área urbana observada en 30 días. Los datos se acomodan para 8 direcciones primarias y 8 secundarias de la brújula.

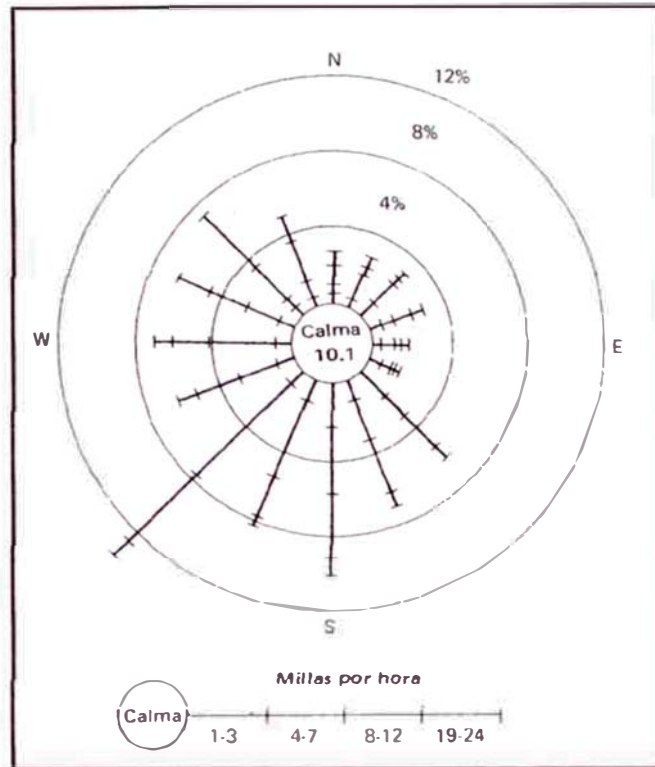


Figura 4.22. Rosa de los vientos hipotética para los datos de la tabla 4.4.

En la fig. 4.22 muestra la forma gráfica de los datos de 4.4. En coordenadas polares, las frecuencias de las varias direcciones observadas del viento son proporcionales a la longitud total de los rayos. La distribución de de las velocidades del viento dentro de cada dirección está indicada por la longitud de las secciones individuales de un rayo determinado. Dirigiéndose hacia fuera desde el centro del círculo, que representa el tiempo en que se observaron periodos de calma, el primer segmento de la línea representa el por ciento de tiempo de 0 a 3 milla/h, el segmento siguiente representa el tiempo de 4 a 7 milla/h, y así sucesivamente. A este gráfico se le conoce como rosa de los vientos. La fig. 4.23(a) muestra una rosa de los vientos real con su típica información sobre la velocidad del viento. Los datos de la fig. 4.23(b), para una localidad diferente, no muestran las distribuciones actuales de los rangos de velocidad del viento en una dirección dada, como se indica en al anterior.

Tabla 4.4. Velocidad y dirección del viento correspondiente a una ciudad hipotética, para un mes especificado.

<i>Frecuencia de la velocidad del viento a intervalos horarios milla/h</i>						
<i>Dirección</i>	<i>1-3</i>	<i>4-7</i>	<i>8-12</i>	<i>13-18</i>	<i>19-24</i>	<i>Total</i>
N	3	4	8	4		19
NNE	4	10	3	2		19
NE	8	8	2	2		20
ENE	4	4	7	3		18
E	2	4	3	2		11
ESE	3	3	2	2		10
SE	12	10	15	5		42
SSE	6	17	20	5		48
S	16	24	24	6		70
SSW	7	31	17	3		58
SW	6	48	35	7		96
WSW	5	16	17	7		45
W	6	24	14	6		50
WNW	5	15	14	12		46
NW	4	4	18	28	4	58
NNW	2	8	18	9		37
Calma	73					
Totales	164	231	220	101	4	720

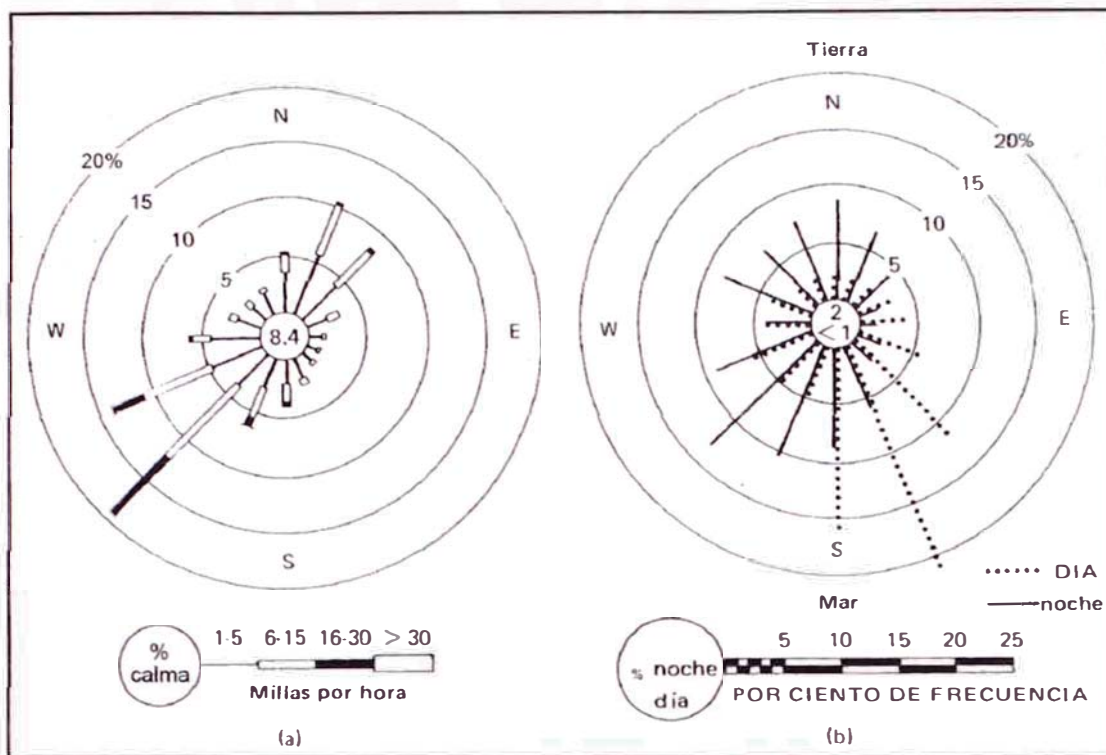


Figura 4.23. (a) Representación típica de los datos de velocidad del viento, por medio de una rosa de los vientos. (b) Una rosa de los vientos diurna y nocturna para la ciudad de Nueva York, que muestra el efecto diurno de la brisa marina. (Fuente: Slade, D. (1968). *Meteorology and Atomic Energy*. Washington, D. C., USA: AEC).

- La Turbulencia.** La turbulencia en la atmósfera incluye las fluctuaciones que tienen una frecuencia de más de 2 ciclos/h. Estos fenómenos son resultados de dos efectos específicos: el calentamiento atmosférico, que es causa de las corrientes de convección naturales (dp/dz) y la turbulencia "mecánica", que es el resultado de los esfuerzos cortantes del viento ($d\mu/dz$). Uno de los dos orígenes de la turbulencia puede imperar sobre el otro. Las turbulencias térmicas prevalecen en los días soleados cuando soplan vientos ligeros y el gradiente de temperatura es altamente negativo. El periodo de estas turbulencias cíclicas será del orden de minutos. Por otro lado, las turbulencias mecánicas predominan junto con la estabilidad neutral en las noches con viento, y las fluctuaciones del viento tienen periodos del orden de segundos. La turbulencia mecánica es el resultado de movimiento del aire sobre

la superficie terrestre y está influida por la situación de los edificios y la relativa rugosidad del terreno.

La desviación estadística normal es una de las descripciones cuantitativas más útiles de las turbulencias y fluctuaciones del viento tomadas en un determinado lapso (1 h).

- *Las Características Generales de las Plumas de las Chimeneas.* Teniendo en cuenta que la dispersión de contaminantes es afectada principalmente por la velocidad promedio del viento y la turbulencia atmosférica. El primer factor se encarga de transportar los contaminantes desde la fuente en la dirección del viento y el segundo hace que los contaminantes fluctúen de la concentración de la corriente principal en las direcciones verticales y transversales del viento. Los tipos de turbulencia observados, mecánica y convectiva, ocurren en forma simultánea, por ello las formas geométricas de las plumas de las chimeneas son variables.

Como se aprecia en la fig. 4.24 puede ocurrir una transición gradual de uno a otro tipo de comportamiento. Se observa que la pluma en espiral presenta una tasa de cambio superadiabática lo que supone fuertes condiciones de estabilidad. Los remolinos térmicos pueden tener la suficiente fuerza como para transportar los contaminantes al nivel del suelo por periodos cortos de tiempo. A pesar que los remolinos tienden a dispersar los contaminantes en grandes espacios suele ocurrir que permiten, en algunos casos, elevar las concentraciones de estos en áreas localizadas del terreno. Una pluma espirar está por lo general asociada con un fuerte calentamiento solar de la superficie del terreno y con vientos ligeros.

La pluma de cono ocurre bajo una estabilidad neutral dominando la turbulencia mecánica en pequeña escala. Como el efecto de calentamiento térmico es más bajo que para el caso de plumas de

espiral, el efecto de cono ocurre cuando los cielos están nublados ya sea de día o noche. Los vientos varían en forma general de moderados a fuertes. Durante el día la cubierta de nubes impide la entrada de la radiación solar, durante la noche el escape de la radiación terrestre. Se tiene por hecho también que el semiángulo de la pluma, de forma de cono, es inferior a 10 grados. Las de forma espiral, en el caso de los conos la mayor parte de la concentración de contaminante es arrastrada bastante lejos por el viento antes de llegar al nivel del terreno en cantidades significativas. Esta constituye una condición especialmente favorable para estimar la dispersión de contaminantes por medio de las ecuaciones de difusión.

La pluma de abanico ocurre en la presencia de grandes tasas de cambio negativas, de manera que tiene lugar una fuerte inversión a una considerable distancia por encima de la altura de la chimenea. La atmósfera es muy estable y no hay turbulencia mecánica. Si la densidad de la pluma permanece constante, se traslada junto con el viento a una elevación aproximadamente constante (fig. 4.24(c)). Las inversiones son características de condiciones nocturnas despejadas, cuando la tierra se enfría por la radiación que se escapa. Observada desde arriba la pluma de abanico serpentea en dirección horizontal por acción del viento. Es complicado anticipar las concentraciones en dirección del viento cuando se presentan abanicos. Sólo pequeñas cantidades del contaminante llegan al suelo.

Las plumas de fumigación ocurren cuando una capa estable de aire está a corta distancia por encima del sitio de emisión de la pluma, y una capa inestable de aire se encuentra debajo de la pluma. La fig. 4.24(d) ilustra los perfiles generales cuando existe inversión más arriba. El perfil de temperatura necesario para la fumigación se origina generalmente temprano en la mañana, después de una noche de inversión estable. El sol de la mañana calienta el suelo,

lo que conduce a su vez a un gradiente negativo de temperatura hacia arriba del terreno. Una vez que la capa inestable recién formada alcanza la altura de una chimenea, grandes concentraciones del gas de la misma serán arrastradas por el viento hasta la superficie del terreno. Las condiciones de fumigación no duran en términos generales más de media hora. No obstante, durante este lapso de alcanzará altas concentraciones del contaminante sobre el terreno. La fumigación se ve favorecida por los cielos despejados y los vientos ligeros predominando más en el verano.

Las condiciones para la pluma de flotación indicadas en la fig. 4.24(e) son contrarias a las de la pluma de fumigación. La capa de inversión está por debajo de la pluma y la capa inestable está dentro y por encima de esta. Lo cual resulta en una condición favorable, ya que los contaminantes se dispersan junto con el viento sin concentraciones significativas a nivel del terreno. Mientras que las condiciones de fumigación son características a primeras horas de la mañana, después de la salida del sol, las condiciones de flotación predominan al caer la tarde y el anochecer, bajo cielos despejados. Durante el día, se establece un gradiente negativo de temperatura en toda la atmósfera baja, como resultado del calor solar. Al caer al tarde, la radiación de la superficie conduce a la formación de una capa de inversión cerca del nivel del terreno. Según se hace más profunda la capa de inversión, una pluma de flotación cambiará a una pluma de abanico. Entonces se puede decir que la pluma de flotación es una situación transitoria. Por otro lado cuando existe inversión por debajo y por arriba de la altura de la chimenea es cuando ocurre un atrapamiento. La difusión de los contaminantes está restringida a la capa entre las dos regiones estables, como se muestra en la fig. 4.24(f).

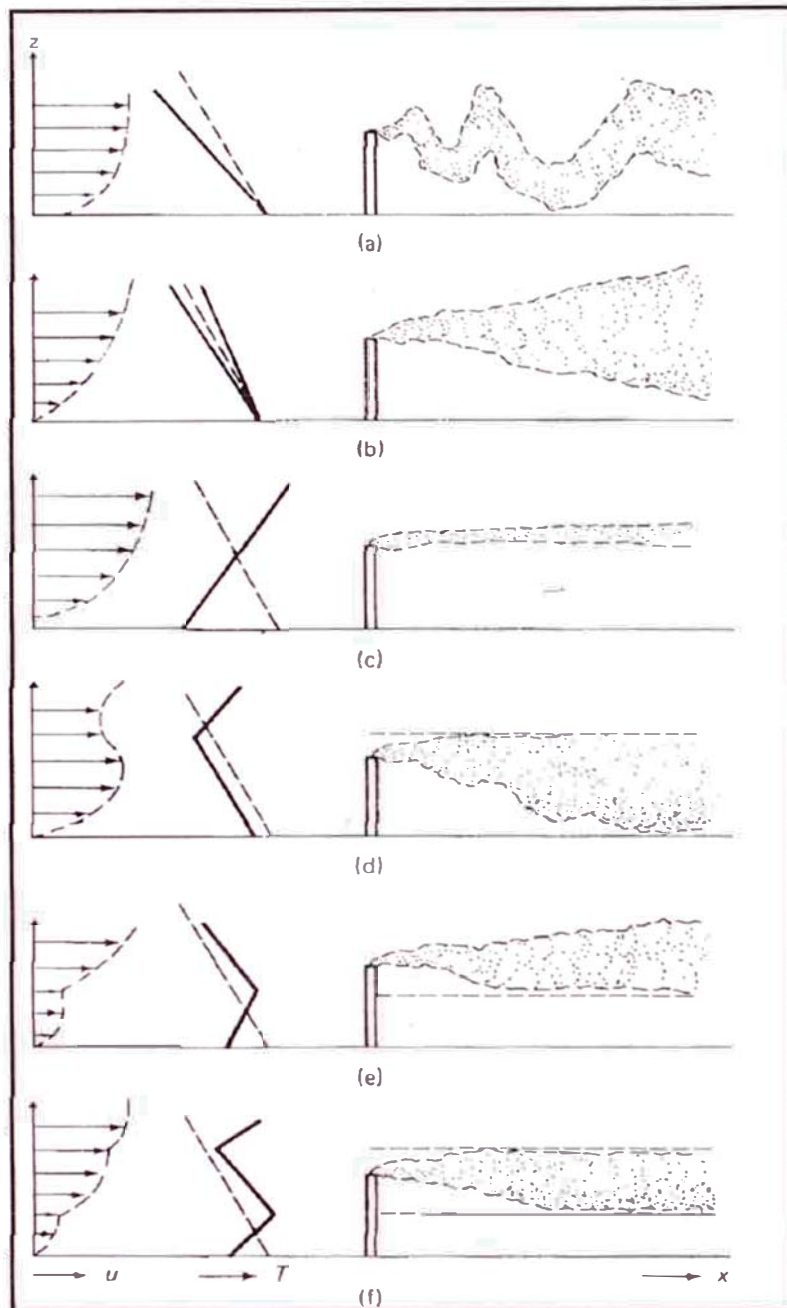


Figura 4.24. Perfiles típicos de velocidad, temperatura y forma de las plumas en el sistema de coordenadas x - z , para diversas condiciones atmosféricas. (Tasa de cambio adiabática seca, --; tasa de cambio ambiental, -.) (a) De espiral, gran inestabilidad; (b) de cono, cerca de la estabilidad neutral; (c) de abanico, inversión de superficie; (d) de fumigación, inversión de flotación; (e) de flotación, inversión por debajo de la chimenea; (f) de atropamiento, inversión por debajo y por encima de la altura de la chimenea.

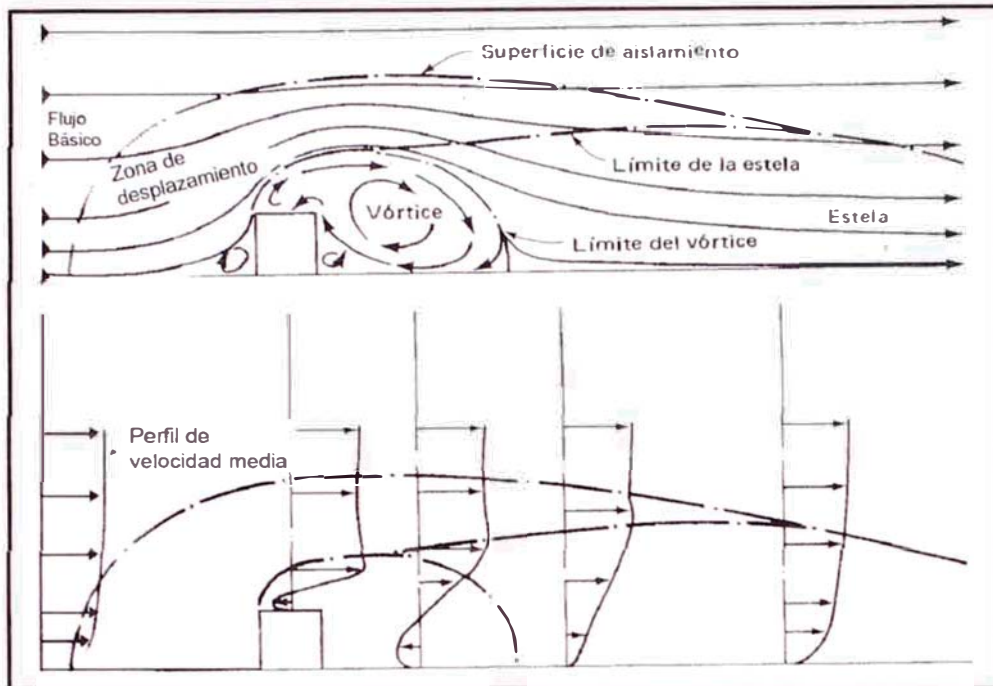


Figura 4.25. Distribución general del patrón de flujo alrededor de un edificio con aristas agudas. (Fuente: Slade, D. (1968). *Meteorology and Atomic Energy*. Washington D. C.: AEC.)

Las características del terreno y los edificios que rodean a la chimenea ejercen una notable influencia sobre comportamiento de la pluma. La fig. 4.25 muestra la influencia de una estructura tipo acantilado frente a un terreno que sería plano. En la figura se observa una sección de remolinos del flujo después de la estructura. El flujo invierte su dirección cerca del terreno detrás del edificio. El otro caso es cuando se sitúa una chimenea como en la fig. 4.26(a), se aprecia el efecto aerodinámico de los remolinos sobre los contaminantes. Cuando la altura de la chimenea es insuficiente, la naturaleza del flujo sobre la parte superior del edificio induce una contracorriente, de manera que las concentraciones de contaminantes son superiores en la parte adyacente al edificio. La situación se agrava cuando la altura de la chimenea disminuye. Existe una condición similar cuando se coloca una chimenea en una posición a favor del viento, con respecto al edificio. El flujo descendente desde el edificio situado

antes de la chimenea hace que el efluente descienda con velocidad al suelo, en una dirección a favor del viento. En la fig. 4.26(b) se muestra una chimenea montada inmediatamente adyacente a un edificio. El efluente de la chimenea no será afectado por el arrastre procedente del edificio. Es fácil visualizar lo que ocurriría si la chimenea no fuera mucho más alta que el edificio. En una situación de este tipo y a fin de evitar el flujo inducido de los contaminantes de la chimenea en dirección al suelo, en las cercanías de un edificio, la altura de la chimenea debe ser cuando menos el doble de la altura del edificio (Wark y Warner, 2005).

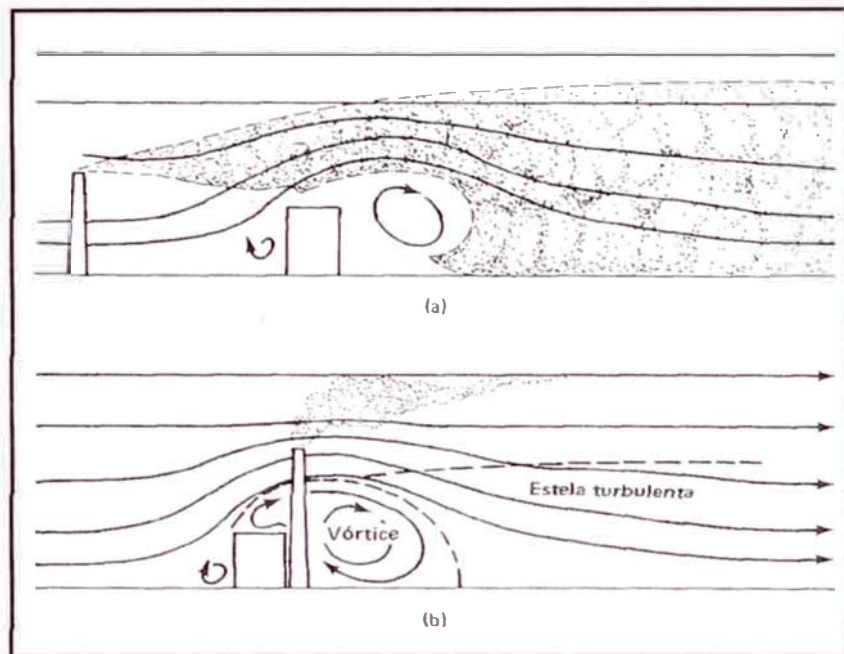


Figura 4.26. (a) El efecto aerodinámico de un edificio situado en la dirección de flujo del viento con respecto a una chimenea, sobre la dispersión del efluente gaseoso. (b) efecto de una chimenea montada sobre o inmediatamente adyacente a un edificio sobre la dispersión en la dirección del viento. (Fuente: Briggs, G. (1969). *Pluma Rise*. USA: AEC).

- *El Efecto de la Isla Calórica.* La atmósfera de una ciudad difiere de la del campo. Las edificaciones forman una superficie irregular que retrasa el flujo del viento. Debido a las superficies perpendiculares y las calles, el área urbana absorbe mayor cantidad de energía

solar durante el día y la conserva durante un periodo más largo durante la noche, comparado con zonas rurales. La ciudad libera también a la atmósfera grandes cantidades de partículas. Este fenómeno es conocido como isla calórica, porque el aire tiene a concentrarse en el centro de la ciudad, luego esta masa de aire se eleva, arrastrando la carga de contaminación, para expandirse y fluir a los bordes de la urbe. A medida que el aire se expande, se enfría, de este modo el aire frío en los bordes de la ciudad retomará al centro de la misma, cerca de la superficie del suelo. Se forma así un sistema circulatorio autocontenido, que sólo se podrá alterar mediante vientos fuertes. Las partículas pequeñas en el aire sobre la ciudad tienden a reducir la energía solar e impiden de este modo que el sol caliente el aire cercano a la superficie. Se reducen las corrientes normales y verticales del aire. El aire inferior bajo el domo de polvo de la ciudad tiende a contaminarse cada vez más.

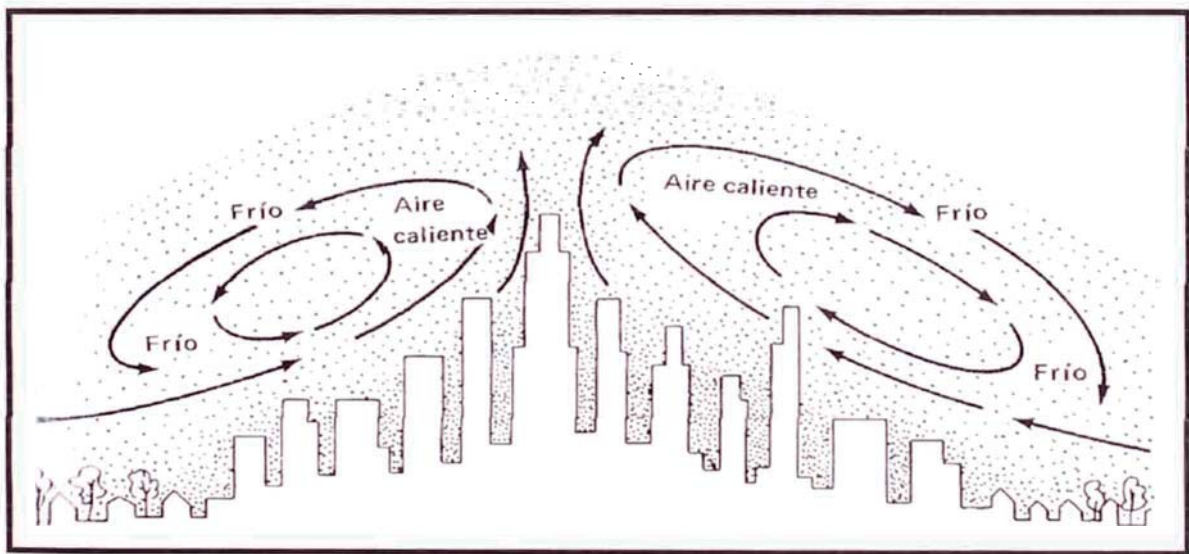


Figura 4.27. Dibujo que muestra el patrón de circulación correspondiente a una isla térmica urbana.

- *La Circulación Global de los Contaminantes.* Es considerable el impacto que tienen los contaminantes sobre la atmósfera, no obstante existen mecanismos de depuración en el medio natural para las emisiones de CO₂, CO, NO_x y los compuestos de azufre.

Estos mecanismos naturales no operan con suficiente rapidez para solucionar problemas locales de contaminación. De por sí, el hecho que exista contaminación en una zona es evidencia que estos mecanismos han sido sobrepasados por la tasa de emisión. Robinson y Robbins (1969) observaron en un estudio que mientras que la tasa anual de CO₂ generado por el hombre es de 1.4×10^{10} y la tasa de generación natural es de 10^{12} , la concentración de CO₂ en la atmósfera es de CO₂ en la atmósfera global aumenta a una tasa de 0.7 ppm/año. Este aumento en el CO₂ representa aproximadamente la mitad del CO₂ producido por todas las fuentes de combustión desde 1900, por tanto tiene que existir un mecanismo natural de depuración. Existen autores que sostienen que el proceso de depuración de CO₂ causado por fuentes naturales tardaría tan solo 17 años en residir en la atmósfera. Se ha reconocido también que el papel predominante de los océanos en el ciclo de CO₂. Se ha estimado que los océanos toman CO₂ a una tasa suficiente para dar al CO₂ atmosférico un tiempo promedio de residencia de 2.5 años. El CO₂ es altamente soluble en los océanos, en donde se almacena o se consume en el crecimiento de plantas y animales marinos.

Tabla 4.5. Fuentes globales, concentraciones y reacciones atmosféricas de los gases trazas (Robinson and Robbins, 1969).

Contaminante	Fuentes importantes	Fuentes naturales	Emisiones estimadas (tons)		Concentración atmosférica de fondo	Tiempo calculado de residencia atmosférica	Reacciones de eliminación y vertederos
			<i>Producidas por el hombre</i>				
			<i>Naturales</i>				
SO ₂	Combustión del carbón y petróleo	Volcanes	146 x 10 ⁶	Ninguna	0.2 ppb	4 días	Oxidación a sulfatos después de la absorción por aerosoles y líquidos
H ₂ S	Procesos químicos, tratamiento de aguas negras	Volcanes, acción biológica en zonas pantanosas.	3 x 10 ⁶	100x10 ⁶	0.2 ppb	2 días	Oxidación a SO ₂

CO	Escape de los vehículos, otros tipos de combustión	Incendios forestales, reacciones del terpeno, océanos	274×10^6	75×10^6	0.1 ppm	3 días	Hongos del terreno, se necesita un gran sumidero
NO/NO ₂	Combustión	Acción bacteriana en los suelos	53×10^6	NO: 430×10^6 NO ₂ : 658×10^6	NO: 0.2-2 ppb NO ₂ : 0.5-4 ppb	5 días	Oxidación a nitratos después de absorción por aerosoles, reacciones fotoquímicas
NH ₃	Tratamientos residuales	Descomposición biológica	4×10^6	1.16×10^6	6-20 ppb	7 días	Formación del sulfato de amonio, oxidación a nitratos
CO ₂	Combustión, océanos, decomposición	Biológicas	1.4×10^6	10^{12}	320 ppb	2-4 años	Absorción en los océanos o biológica

HCs	Combustión, procesos químicos	Biológicas	88 x 1	480 x 10	CH ₄ : 1.5 años	CH ₄ : 16 años	Reacciones fotoquímicas, es necesario un gran sumidero para el metano
------------	-------------------------------------	------------	--------	----------	----------------------------	---------------------------	---

4.1.2.2. La Contaminación del Aire

Es considerada como uno de los problemas más críticos y con más efectos sobre la población en el presente siglo. Cuando se refiere a localidades, son los automotores los que contaminan en forma aproximada 2.5 Kg de dióxido de carbono por litro de combustible consumido, sólo por apartar un ejemplo. Con este compuesto en la atmósfera se produce el smog, que es una mezcla de polvos, ácidos y humo que al entrar en contacto con la neblina se transforma en sustancias dañinas para la salud del hombre. Otros factores que agravan el problema en ciudades como Santiago de Chile y el Distrito Federal de México son la topografía y la inversión térmica que evita que las corrientes de aire puedan circular con fluidez horizontal y verticalmente (Kuroiwa, 2002).

La problemática de contaminación atmosférica radica en la combustión de fósiles (sobre todo de carbón), por ello se han adoptado medidas tecnológicas para la reducción en la emisión de gases y cenizas de las chimeneas de plantas térmicas de generación de energía eléctrica. Otro factor importante, como ya se ha mencionado es el parque automotor, por ello las compañías fabricantes de vehículos motorizados han usado dispositivos paliativos como el introducción del convertidor catalítico. Además existe otra fuente masiva de contaminación atmosférica como es la producción de energía, la reducción de esta incorporación consiste en sustituir el carbón por combustibles de combustión más completa como el gas natural como primera etapa y sucesivamente consumir tipos de energía más limpia como la sola, eólica o marina. Las opciones de reducción pueden ser variadas pero implica la participación de la ciudadanía como el uso de medios de transporte colectivos (Kuroiwa, 2002).

En la costa peruana las fábricas de harina de pescado emiten mezclas que contienen óxidos de carbono, trimetilamina, aldehídos, acetonas, ácido sulfúrico, amoniaco, partículas orgánicas proteicas y sustancia oleaginosas que causan trastornos en la salud y son molestas por el olor que despiden.

4.1.3. Contaminantes Atmosféricos

“Cualquier sustancia presente en el aire que por su naturaleza sea capaz de modificar los constituyentes naturales de la atmósfera, alterando sus propiedades físicas o químicas. Su concentración y periodo de permanencia puede originar efectos nocivos sobre la salud de las personas y el ambiente” (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2001).

4.1.3.1. Los Compuestos Gaseosos del Carbono

- a. **Los Hidrocarburos.** Grupo heterogéneo que tiene como fuente principal las combustiones incompletas de fuentes fijas y vehículos motorizados. Las emisiones producidas por vehículos motorizados ligeros no quemar totalmente los combustibles y emiten una parte atomizada (benzopireno). Asimismo los ferrocarriles y barcos emiten grandes cantidades de contaminantes por no ser quemados totalmente. En cuanto a las aeronaves, por la variedad de sus combustibles emiten diversos hidrocarburos, sobre todo aromáticos, como benceno, tolueno, meta y paraxilenos, ortoxileno, etc. La cantidad de hidrocarburos depende: tipo de combustible, tipo de motor, estado de motor, características de la circulación, legislación vigente.

Por otro lado las combustiones en instalaciones fijas como en el caso de las industrias y calefacciones que utilizan “fuel-oil” cabe suponer que cierta incidencia sobre la contaminación se debe a: viscosidad, punto de fluidez, contenido en agua y sedimentos, contenido de ceniza, inflamabilidad, contenido de carbono (Índice de Richardson) y en azufre. Las salidas de humos y emanaciones (chimeneas y conductos) influyen según características de altura, volumen de las emisiones, diámetro, condiciones meteorológicas, etc. Las industrias a través del consumo de hidrocarburos en hornos, calderas, calefacción, centrales térmicas, etc., emiten cantidades considerables de contaminantes a la atmósfera.

Las combustiones incompletas sintetizan hidrocarburos generando un “cracking” produciendo compuestos alifáticos dando como resultado la

creación de hidrocarburos no saturados (olefinas) procedentes de los compuestos no quemados. “Estos productos son responsables, en parte, de la aparición de PAN (nitrato de preasilo) en zonas muy contaminadas y con acción fotoquímica intensa debida a la radiación solar, entre otras causas (Seoáñez, 2002).

Tabla 4.6. Tabla de Grob et al. de Concentración Media de Hidrocarburos en Atmósfera Humana (Seoáñez, 2002).

Hidrocarburo	Concentración (ppm)
Metano	2.00
Etano	0.05
Etileno	0.03
Acetileno	0.03
n-Butano	0.03
Isopentano	0.02
Propano	0.02
Tolueno	0.02
n-Pentano	0.02
m-Xileno	0.02
Solutano	0.02
Propileno	0.01
Buteno	0.01

- b. Los Hidrocarburos Oxigenados.** En este grupo se incluyen los alcoholes, aldehidos, cetonas, éteres, fenoles, ésteres, peróxidos y ácidos orgánicos. Su presencia es atribuida a las emisiones de los automóviles, no obstante se forma también por reacciones fotoquímicas (Galdames, 2000).
- c. El Monóxido de Carbono.** Señalado por Lassane en 1776 y reconocido por Cruikshank en 1796. El monóxido de carbono proviene de las combustiones incompletas en las zonas urbanas. Estas combustiones pueden ser a partir de carbón, del petróleo y de otros combustibles orgánicos, en viviendas en industrias o en gases de escape de los vehículos de motores y contienen hasta el 15 por ciento de CO.

Otra fuente de contaminación importante es el mar, ya que se han observado en zonas alejadas de la costa cantidades hasta 100 veces más elevadas que las que corresponden a su solubilidad a la presión parcial en esas zonas. Una teoría que explica este fenómeno es la oxidación biológica de los microorganismos.

El CO atmosférico tiene concentración variable, en lugares no contaminados se encuentra entre 0.002 y 1.5 ppm mientras que en otros de distintas características están entre 100 y 350 ppm en las proximidades de focos emisores (generalmente en ciudades con alto tráfico de vehículos y ciertas condiciones climatológicas).

El tiempo de permanencia del CO es de 0.2 años debido a la descomposición: primero la por la acción fotoquímica del ozono, después la reacción del oxígeno atómico con el vapor de agua y finalmente la transformación a CO₂ y H.

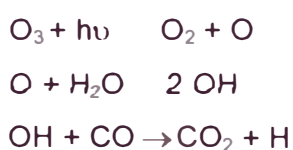


Tabla 4.7. Fuentes Básicas del CO Atmosférico (Seoánez, 2002).

Naturales	Antropogénicas
Océanos	Gasolinas
Oxidación de los Terpenos Vegetales	Carbón
Oxidación de CH ₄	Madera
	Incineración de Residuos Urbanos
	Incendios Forestales

Algunos ejemplos al respecto de la cantidad emanada de CO a la atmósfera radican per se en la combustión de tabaco produce de 0.1 a 0.3 cm³ de este gas. En la atmósfera de las minas el CO es emitido por la oxidación lenta del carbón y por lo explosivos. Así también en las aplicaciones militares, Svetlov aseguraba que 1 Kg de pólvora B produce 300 l de Co y 1 Kg de tolita puede originar hasta 600 l del mismo gas.

Otros ejemplos de formaciones de CO son en la industria del aluminio al efectuarse la combustión de ánodos en la electrólisis. Además se tiene que el gas del alumbrado contiene hasta un 18 por ciento de CO y el del agua está formado por CO hasta 40 por ciento; los gases de los altos hornos tienen hasta 34 por ciento y de los hornos de cok contienen entre 5 y 7 por ciento de CO (Seoanez, 2002).

La fuente que posee mayor impacto en la atmósfera puede ser la de la combustión incompleta generada en los vehículos; la proporción de CO varía según las condiciones específicas de cada núcleo urbano (vientos, altura de construcciones, etc.) contribuyendo a agravar o disminuir el porcentaje de este agente contaminante.

Esta considerado como gas asfixiante debido a su capacidad de combinación con la hemoglobina de la sangre reduciendo la oxigenación de los tejidos celulares.

Se produce en la combustión incompleta del carbón y de sus compuestos, y una de sus principales fuentes de emisión es el parque automotor, aunque también se produce en la naturaleza, fundamentalmente por la actividad de algas (Galdames, 2000).

- d. **El Dióxido de Carbono.** La mayor parte del CO₂ se produce en la respiración de las biocenosis, la respiración de los vegetales para la fotosíntesis, y sobre todo, en las combustiones de productos fósiles (petróleo y carbón).

El aumento de la concentración de este gas, entre otros, produce el efecto conocido como invernadero, es causado por la transparencia del CO₂, que por una parte permite pasar mejor la radiación solar y por otra provoca una mayor retención de la radiación IR emitida desde la tierra. Debido a la industrialización se habla de 278 ppm de CO₂ presentes en el aire en 1950, de 340 en 1987 y de 360 en 1991 (Seoáñez, 2002)

4.1.3.2. Los Compuestos Gaseosos del Azufre

- a. **Los Oxidos de Azufre.** De los posibles óxidos de azufre los relevantes a la calidad ambiental son el dióxido y el trióxido (Galdames, 2000)

La fuente más importante de SO₂ natural es la actividad volcánica. Su concentración normal en la atmósfera es de 0.2 ppb. Este gas es más pesado que el aire, se puede licuar a 20° C y 3.3 atm y es muy soluble en el agua disolviéndose en 1 l de agua 80 l de SO₂.

Las propiedades químicas relacionadas a la contaminación atmosférica son las siguientes: es un reductor energético y se oxida con suma facilidad a velocidades variables, en el agua actúa en tres etapas:



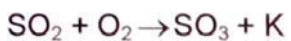
La combinación forma un diácido (débil) de constantes de disociación

$$K_1 = 1.7 \times 10^{-2}$$

$$K_2 = 10^{-7}$$

La actividad humana emite este contaminante a través de las combustiones. El petróleo y el carbón son los que contienen variables cantidades de azufre y en su combustión producen SO₂. Estas emisiones generalmente se aprecian en lugares de alta densidad poblacional donde las actividades son fuente de emisión de este gas (vehículos motorizados, calefacción doméstica, industrias, etc.) y en las zonas rurales donde se realizan actividades diversas (centrales térmicas, refinerías, y otras).

Debido al carácter reductor del SO₂ sufre algunas alteraciones en la atmósfera. Bajo la acción de los rayos UV se tiene:



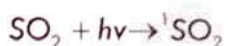
Cuando reacciona en forma exotérmica con vapor de agua el SO₂ se transforma en ácido sulfuroso, la reacción es catalizada por partículas sólidas como Mn o Fe.

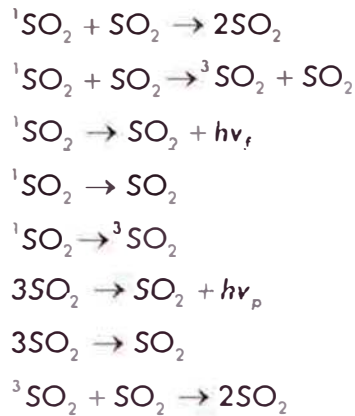


El H₂SO₃ no es estable, por lo tanto, es transformado a H₂SO₄ por medio de radiaciones UV y otras reacciones fotoquímicas. La evolución total del SO₂, en forma independiente de la alteración parcial del gas, puede ser dinamizada por la asimilación directa de seres vivos y suelos:



Por otro lado, el SO₂ entra en excitación electrónica al absorber la radiación solar, existiendo una fotooxidación con las siguientes reacciones (Seoáñez, 2002):



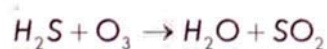


El SO_3 se emite conjuntamente con el SO_2 en una proporción del 1 a 5 %, pero se combina rápidamente con el vapor de agua para formar ácido sulfúrico.

El SO_2 es un gas incoloro y de olor irritante, las emisiones de este gas en su mayoría, corresponden al uso de combustibles fósiles (Galdames, 2000)

- b. **El Sulfuro de Hidrógeno.** Las fuentes de contaminación naturales de este gas son: pantanos, lodazales de marea y turberas. Así también la actividad volcánica emite H_2S , pero esta se desprecia porque no se compara con los procesos de descomposición biológica. Por el lado antropogénico cuando se realizan combustiones incompletas, o con defecto de oxígeno, el azufre de los fósiles se transforma en SH_2 , al igual que el carbono en CO . Los procesos industriales como el del papel, plantas de aguas residuales, hornos de coque y fabricación de acero son también fuentes principales de este compuesto. El H_2S se oxida en forma rápida a SO_2 , hasta un 80% fueron inicialmente emitidas en forma de H_2S y luego transformadas en SO_2 .

El H_2S puede ser degradado por el oxígeno atómico, molecular y por el ozono.



La rapidez de reacción mejora en la superficie de las partículas presentes en el aire, aunque de por sí, la reacción es lenta cuando sus componentes se encuentran en estado gaseoso. Se estima que la permanencia de 1 ppb de H₂S como tal, expuesto a 0.05 ppm de O₃ en presencia de 150 000 partículas/cm³ es de 2 h. El ritmo de oxidación del H₂S en gotas de niebla o vapor es mayor (Colegio Oficial de Físicos, 2005).

El sulfuro de hidrógeno posee olor característico a huevos en estado de putrefacción (Galdames, 2002).

4.1.3.3. Los Compuestos Gaseosos del Nitrógeno

- a. **Los Oxidos de Nitrógeno.** Los óxidos de nitrógeno incluyen los siguientes compuestos, siendo los tres primeros en la siguiente lista los más representes para efectos de contaminación atmosférica: óxido nitroso (N₂O), óxido nítrico (NO), trióxido de nitrógeno (NO₃), sesquióxido de nitrógeno (N₂O₃), tetróxido de nitrógeno (N₂O₄) y pentóxido de nitrógeno (N₂O₅), también pueden encontrarse en el aire los correspondientes ácidos: el ácido nítrico (HNO₃) y el ácido nitroso (HNO₂).

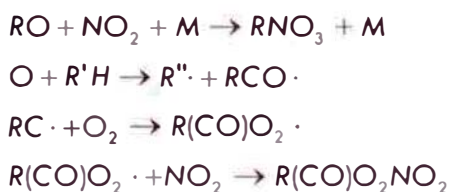
El NO es producido por acción biológica y en los procesos de combustión. Es oxidado por acción del ozono para producir NO₂ el tiempo de residencia en la atmósfera es de 5 días.

El NO₂ es uno de los contaminantes irritante y se descompone por medio de la luz solar según la reacción:

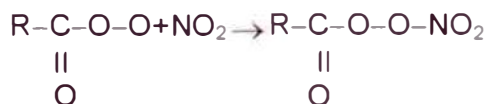


La formación de oxígeno atómico, que es muy reactivo, convierte al oxígeno en ozono.

- b. **El Amoniaco.** El amoniaco (NH_3) esta considerado un contaminante de poca importancia. Su presencia en la atmósfera se debe principalmente a la acción de las bacterias, el tiempo de residencia esta estimado en 7 días no conociéndose efectos dañinos para la salud.
- c. **Los PAN, PPN y PBN.** Existen contaminantes específicos que reaccionan entre sí por acción fotoquímica en lugares de elevado índice de luminosidad y contaminación. Así, se forman unos compuestos, de base radicales aromáticos, alifáticos o heterocíclicos, propios del smog oxidante. El proceso químico de formación es:



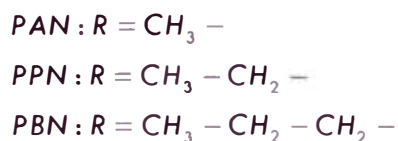
Siendo la reacción general:



El R corresponde al radical aromático, alifático o heterocíclico.

Durante el proceso de formación de los PAN (nitratos de peroxiacetilo) aparece el ozono en las primeras etapas. Así también cuando sucede la formación de los PAN se produce smog ácido.

Los PPN (nitrito de peroxibirilo) son menos tóxicos que el PAN, siendo estos, los primeros miembros de la serie alifática



Las concentraciones de PAN fuera de focos de contaminación es de alrededor de 50 ppb, dependiendo de las condiciones meteorológicas.

En presencia de UV y reaccionando con ozono tenemos:



Este ozono al reaccionar con los hidrocarburos presentes en el aire los convertirá primero en aloilperóxido, después en peroxiacilos y finalmente en PAN (Seoáñez, 2002).

4.1.3.4. Los Gases Halogenados

En este grupo se consideran los derivados del flúor, cloro y bromo. De todos ellos el cloro, el fluoruro, el cloruro de hidrógeno, los freones, los pesticidas y los herbicidas halogenados son los que se encuentran con mayor frecuencia. Los más peligrosos para el medio ambiente, por sus efectos nocivos en animales y plantas, son los herbicidas y plaguicidas, así como los fluoruros, que, a su vez, son altamente corrosivos en presencia de vapor de agua. Por otra parte, los freones deben tenerse en cuenta debido a su posible capacidad de destruir la capa de ozono (Bolin, 1991).

4.1.3.5. El Ozono

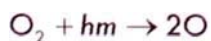
Es producido por las reacciones de los óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre con la luz solar. Las fuentes de estos compuestos son las emisiones por la combustión de combustibles, solventes químicos y otros. La facilidad de formación de ozono dependerá de la temperatura, radiación solar y las fuentes de emisión.

El ozono, que es un gas de color azul pálido y al licuarse forma un líquido azul oscuro, está constituido por 3 átomos de oxígeno y es una forma alotrópica del mismo elemento. El ozono es un oxidante muy activo por lo que se usa como desinfectante. Se descompone con rapidez en oxígeno a temperaturas mayores de 100° C y a temperatura ambiente en presencia de catalizadores como el dióxido de manganeso.

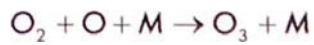
Tanto el oxígeno atómico como el ozono son muy reactivos con los hidrocarburos olefínicos produciendo aldehídos, cetonas y alcoholes. El ozono absorbe las radiaciones ultravioletas de 30 nanómetros de longitud de onda la cual es letal para seres humanos. Los rayos UV tipo B de 280 a 320 nm producen mutaciones genéticas en el ADN propiciando cáncer de piel, melanoma y cataratas. Además debilita el sistema inmunológico lo que genera el desarrollo de otras enfermedades, así también disminuye el proceso de fotosíntesis en las plantas. Otros usos que se le da al ozono es la remediación de olores atosigantes producto del tratamiento de aguas servidas. La concentraciones para este tipo de tratamiento varían entre 10 y 20 ppm, las cuales serían fatales para el hombre ya que lo establecido para proteger su salud es de 0.1 ppm en jornadas de 8 horas. La inhalación de ozono presente en el smog fotoquímico ocasiona tos, dificultad al respirar, irritación en nariz y garganta, aumenta molestias y agrava enfermedades crónicas como el asma, bronquitis, enfisema y trastornos cardíacos. El ozono atmosférico lo producen en su mayoría motores eléctricos, los relámpagos y la radiación ultravioleta solar con el oxígeno del aire (Lomeli, Tamayo e Ibarra, 2000).

La concentración del ozono puede oscilar entre 7 y 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a nivel del mar dependiendo de la actividad meteorológica y luminiscencia. Si la contaminación es baja en zonas urbanas, el ozono puede reaccionar con las olefinas de los escapes de los vehículos motorizados y su concentración disminuye. El uso de productos que contengan CFC's (clorofluorocarbonos) son los causantes de la desintegración del ozono por lo que se acordó no producirlos más por la mayoría de países.

La tendencia natural del ozono en la atmósfera es la de un equilibrio fotoquímico con diminutas oscilaciones en el periodo de un año. Esto sucede así porque el oxígeno del aire y el mismo ozono atmosférico absorben la radiación UV, ocurriendo



siendo $h\nu$ un fotón de luz de la misma longitud de onda

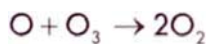


siendo M casi siempre O_2 o N_2 (Seoáñez, 2002)

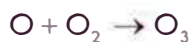
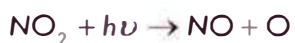
El ozono se descompone principalmente por la acción de los CFC's que como se mencionó, contienen cloro, flúor y carbono; se usan en refrigeración, aire acondicionado, aerosoles y materiales aislantes y se creía que eran químicamente inertes. La inactividad de estos agentes culmina a partir de los 20 Km donde la concentración de ozono es mayor. Al descomponerse los CFC's por acción de los rayos UV liberan cloro atómico el cual es muy reactivo y destruye hasta 100 000 moléculas de ozono.



Se observa la acción catalítica del átomo de cloro de acuerdo a las dos ecuaciones químicas. El monóxido de cloro que es un subproducto de los CFC's también destruye a la molécula de ozono. La reacción química es:



Las reacciones químicas de formación y descomposición del ozono:



En condiciones variadas (Secretaría del Medio Ambiente, 2000).

Si el ozono oxida el NO_2 que pueda existir como contaminante atmosférico, se verificará:



Si existen aldehídos en el aire, el ozono los oxida, de esta forma se puede explicar la reducción de concentraciones de algunos de estos contaminantes al final del día en atmósfera urbana, pues son oxidados por el ozono que esta presente en cantidades relativamente elevadas durante el día:



pudiendo ser A, cualquiera de estas formas: HC (hidrocarburos), VOC (componentes orgánicos volátiles), ROG (gases orgánicos reactivos), NMHC (hidrocarburos no metálicos) o NMOG (gases orgánicos no metálicos) (Seoáñez, 2002).

4.1.3.6. Metales y Derivados

Algunos metales y sus derivados presentan valores suficientemente altos de presión de vapor, por lo tanto, pueden existir como gases en la atmósfera. El mercurio, por ejemplo muestra esta condición en la refinación y en el uso de combustibles con alto contenido de esta sustancia. Así también el plomo, en forma de sus alquiderivados utilizados en combustible para motores (Galdames, 2000).

Los metales pesados aparecen generalmente aislados, con polvo o formando aerosoles, en su mayoría son originados por la actividad humana. Se encuentran también en las lluvias ácidas (Be, Th, Zn, Al, Pb, Hg) y son contaminantes cuando exceden las concentraciones benéficas para los seres vivos. Los metales pesados más comunes de densidad superior a los 4 g/cm^3 son: Pb, Cd, Be, Zn, Th, V, Hg, Ni, Cr. En los seres vivos estos metales se bioacumulan en los órganos y tejidos provocando enfermedades e insuficiencias.

Las actividades industriales y el parque automotor son las principales fuentes de contaminación de estos agentes. En muchos combustibles se volatilizan Pb, Zn y Cd.

La contaminación de algunos metales es conocida desde hace más de 2000 años, como sucede con el Pb y el Hg (producción de vino y amalgamas en la extracción de oro, etc.) El plomo se utilizaba en la gasolina como antidetonante pero se prohibió el uso en la UE a partir del 2001. Así también la soldadura con estaño desprende partículas de óxido de plomo, pues contiene hasta 70% de plomo. La soldadura eléctrica es la que permite que se emanen los humos metálicos nocivos. El decapado en caliente de superficies pintadas provoca la formación de humos conteniendo Pb, Cd o Cr. Son las pinturas las que llevan el metal según su pigmentación, como Pb (rojas, naranjas o amarillas), Cd (amarillas), Cr (pinturas anticorrosión) o Hg (ciertas pintura marinas).

- a. **El Plomo.** Las principales fuentes de contaminación por Pb atmosférico con: escapes de los motores de combustión, emisiones de la combustión de carbón, extracción y refinado. Además las formas de presentación del plomo en la atmósfera son: Pb, PbS, PbSO₄, PbBrCl, PbCO₃, PbBr₃, PbCl₂, PbO_x, Pb(OH)Cl, Pb(OH)Br, Pb₃(PO₄)₂, 2PbBrCl·NH₄Cl, 3PbO·PbSO₄, 2PbO·PbCl₂, 2PbO·PbBrCl.
- b. **El Mercurio.** El atmosférico es otro de los contaminantes que proviene de las industrias, de la quema de residuos sólidos y de ciertos tubos fluorescentes. Aquí se enumeran algunos de los usos fundamentales del mercurio: electrólisis, pinturas, amalgamas de uso médico e industriales, tratamientos agrícolas, tratamiento de plásticos, aparatos eléctricos, instrumentos de control, productos farmacéuticos, papel y pasta de papel, curtidos, agente de transmisión de calor. Estos usos a través de las siguientes industrias: del cloro, de la sosa, de aparatos eléctricos, de producción primaria y secundaria de metales, minería de sulfuros y las industrias dedicadas a la producción de superfosfatos.

Al tener una presión de vapor relativamente alta, el mercurio puede evaporarse desde el suelo, intensificándose por la acción de microorganismos que transforman el mercurio inorgánico en compuestos de metal y dimetilmercurio, estos últimos también con alta presión de vapor. El mercurio mantiene mayor presencia en zonas industriales, ciudades, zonas volcánicas y ciertas áreas agrícolas.

- c. **El Cadmio.** Es también uno de los elementos que representan gran toxicidad para los seres vivos. Sus fuentes de emisión principales se encuentran en el uso de acumuladores, pilas, tratamiento de superficies o en las industrias plásticas, combustión de carbones, hidrocarburos y plásticos.
- d. **El Níquel.** Se emite a la atmósfera en algunos procesos industriales, en manufacturas y en combustión de aceites residuales.
- e. **El Berilio.** Se emite a la atmósfera en procesos de combustión de grandes cantidades de carbón, en extracción, en metalurgia, y fundición de metales.
- f. **El Vanadio.** Se desprende en procesos industriales, metalúrgicos y combustión de fuel oil.
- g. **El Cromo.** Este metal así como sus derivados (tetraivalente, hexavalente, etc.) son altamente tóxicos para la biocenosis. Se emiten en ciertos procesos de recubrimiento electrolítico, de manufacturado, combustión de carbón y la incineración de residuos sólidos.
- h. **El Zinc.** Metal insoluble en agua pero no en ácidos y bases, se emite en los procesos de extracción en forma de polvo siendo tóxico e inflamable presentando riesgos de explosión.

En otros términos la combustión de residuos puede provocar la emisión de metales alcalinos, alcalinos-térreos y restos de metales (en forma sólida o gaseosa) de óxidos metálicos o de sales metálicas mezcladas con otras emisiones, disueltas o como componentes de los humos. En general, estos casos hacen aparecer Pb, Zn, Cd, Hg y Mn.

4.1.3.7. Los Aerosoles y Partículas

Las sustancias suspendidas en la atmósfera como: partículas de polvo, polen, hollín, metales, asbestos, dioxinas, pesticidas, etc. suelen denominarse aerosoles por contar con un diámetro inferior a 100 μm y en estado sólido o líquido (Fundación MAPFRE, 1983). Partículas se suele llamar a los sólidos que forman parte del aerosol, mientras que se suele llamar polvo a la materia sólida de tamaño un poco mayor (de 20 μm o más). Las partículas mayores a 10 μm pueden tener un interés local porque pueden ser transportados mientras se suspendan en la atmósfera, esto es uno o dos días; las menores pueden estar suspendidas hasta varias semanas dependiendo de las condiciones meteorológicas. Algunas de estas partículas son especialmente tóxicas para los humanos y, en la práctica, los principales riesgos para la salud humana por la contaminación del aire provienen de este tipo de polución, especialmente abundante en las ciudades (Bridgam, 1990). En una atmósfera urbana pueden identificarse partículas de diferentes características; una de ellas es el polvo debido a la desintegración mecánica, con tamaño entre 0,1 y 0,5 micrómetros; humos que se forman por la condensación de vapores sobresaturados, por sublimación o bien producidas en las reacciones químicas, con un tamaño aproximado de 1 micrón; brumas formadas por la suspensión de diminutas gotas procedentes de la condensación de gases o vapores sobre núcleos adecuados, el tamaño de estas partículas son aproximadamente de 10 micrones (Galdames, 2000).

- a. **Aerosoles Primarios.** Son los emitidos a la atmósfera desde la *superficie terrestre*, los que tienen como origen: volcanes, incendios forestales, mares, biológico y actividades humanas.

- b. **Aerosoles Secundarios.** Se forman en la atmósfera mediante reacciones químicas que afectan a gases, otros aerosoles, humedad, etc. Suelen crecer rápidamente a partir de un núcleo inicial. Entre los aerosoles secundarios más abundantes están los iones sulfato y los iones nitrato.

Los aerosoles pueden influir sobre el clima produciendo calentamiento al absorber radiación o pueden provocar enfriamiento al reflejar parte de la radiación que incide en la atmósfera. No existe claridad en los estudios para concretar la dinámica de este proceso. Probablemente contribuyen al calentamiento en las áreas urbanas y siempre contribuyen al enfriamiento cuando están en la alta atmósfera porque reflejan la radiación disminuyendo la que llega a la superficie (Higgins, 1995).

"Al conjunto de partículas que pueden encontrarse en la atmósfera se conoce con el nombre de aerosol. El aerosol de las zonas urbanas contaminadas está formado, generalmente, por polvo de sílice, no obstante otros compuestos químicos de diversa índole pueden encontrarse en la atmósfera en forma de aerosol; este es el caso de los sulfatos.

Hay tres mecanismos posibles por lo menos:

- Fotooxidación de SO_2 en presencia de hidrocarburos insaturados y NO_2 .
- Oxidación de SO_2 en presencia de gotas de agua catalizada por iones metálicos.
- Oxidación catalítica de SO_2 adsorbido en partículas sólidas.

También pueden encontrarse en el aerosol metales contaminantes, el plomo, producido por los aditivos añadidos a las gasolinas que utilizan los motores de los automóviles, es uno de los más característicos. Otros metales como cromo, cadmio, hierro, zinc, etc., también han sido determinados así como diferentes aniones: cloruros, bromuros, nitratos, etc." (Galdames, 2000)

4.1.3.8. Otros Contaminantes

- a. **Los Derivados del Cloro.** Los numerosos derivados del cloro representan también contaminantes atmosféricos. El ácido clorhídrico, de distintas aplicaciones industriales, es un ácido inerte, corrosivo, tóxico por inhalación y fitotóxico, incluso en concentraciones muy bajas. Es muy soluble en agua así que su presencia en el aire es inmediata cuando se presenta en este medio.

La incineración de residuos emite entre otros productos (como metales pesados o ácidos fluorhídrico), ácido clorhídrico, siendo esta práctica muy común en países en desarrollo. Los residuos contienen polímeros orgánicos clorados que en la quema originan HCl.

El cloro aparece en el aire en partículas o gas (Cl_2 o HCl) y puede tener como origen natural el agua de mar cuando arrastra sal sólida (ión cloruro disuelto). En forma natural oscila en $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otro lado, la formación de HCl puede tener como origen el H_2SO_4 presente en la atmósfera debido a la acidificación química del SO_2 . Asimismo la actividad humana como la del transporte es fuente de cloro y sus derivados, los gases provenientes del escape de los vehículos motorizados, en algunos casos, contienen plomo como antidetonante que al quemar forman aerosoles de haluros de plomo, que por acción fotoquímica se descomponen y dan origen al Cl atómico. La eliminación del enriquecimiento del plomo en la gasolina ha logrado eliminar una fuente importante de halógenos.

- b. **El Bromo.** En términos generales puede proceder del mar o de la contaminación generada por el ser humano en la combustión de gasolinas con componentes antidetonantes derivados del plomo. El bromo también puede venir captándose del mar a la atmósfera como consecuencia de la evaporación.

- c. **El Yodo.** Esta sustancia al igual que los anteriores puede también tener como origen natural al mar y como antropogénico actividades industriales como la producción de energía de origen nuclear.

El contenido de yodo en la atmósfera puede llegar hasta $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en condiciones normales, siendo su concentración media de $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Abunda, como el bromo, en forma de partículas cuando tiene origen natural y se desprende de la fuente, para formarse como gas o interactuar con otros elementos usando reacciones fotoquímicas para este fin.

Las fuentes artificiales más importantes radican en la combustión de combustibles fósiles, que genera yoduros. Así también la formación de I^{131} se debe a la fisión nuclear para generar energía, esta isótopo puede suele ser absorbido por las partículas sólidas presentes en el aire. Puede presentarse como I_2 gaseoso o yoduros alifáticos (por ejemplo CH_3I) los que son más fácilmente absorbidos por las partículas sólidas.

- d. **El Arsénico.** Aparece en diversas actividades humanas, algunas referidas a tratamientos agrícolas e industria farmacéutica, presente incluso en los tambores de las máquinas fotocopiadoras. Este elemento tóxico cuando alcanza cierta concentración en la atmósfera se forma anhídrido arsénico acumulándose en los vegetales, estos a su vez son ingeridos por los animales y por el hombre.
- e. **El Benceno.** Es un componente VOC (compuesto orgánico volátil, por sus siglas en inglés), constituyente menor del petróleo. Las fuentes principales de benceno en la atmósfera son la distribución y combustión de petróleo. El 70% de este contaminante es emitido por la combustión vehicular.

Algunos de los efectos más conocidos en la salud incluyen cáncer, desórdenes del sistema nervioso, daño al hígado y los riñones, problemas con el sistema reproductor y defectos en recién nacidos.

- f. **El 1.3 Butadieno.** Así como el benceno es un VOC emitido en la atmósfera a través de la combustión del petróleo y en vehículos diesel. Es también importante en algunos procesos industriales químicos, particularmente en la manufactura de caucho sintético.

Los posibles efectos crónicos a la salud incluyen cáncer, desórdenes en el sistema nervioso central, daños al hígado y riñones, desórdenes en el sistema reproductor y defectos en recién nacidos (AEA, 2006).

- g. **Las Fases de Energía Nuclear.** La contaminación emitida al aire por esta actividad está dividida en sus fases y sus principales emisiones:
- *Extracción.* Polvo y partículas de suelo y roca, radón y su serie.
 - *Concentración y Tratamiento.* U, Th, Ra, Po y Pb.
 - *Enriquecimiento.* Emisiones no radiactivas por la producción de electricidad que consume el proceso.
 - *Fabricación de los Elementos Combustibles.* Pérdidas generales del 1%.
 - *Transformación de la Energía (Centrales Nucleares).* Por fisión o activación: efluentes gaseosos hidrogenados (productos de fisión gaseosos como yodo, trazas de gases raros e hidrógeno), efluentes gaseosos aireados, calor por la refrigeración de aire y agua.
 - *Tratamiento de Combustibles Usados.* I^{131} , C^{14} , tritio y radioisótopos de Ru, Cs y Sr (Seoáñez, 2002).

Tabla 4.8. Contaminantes atmosféricos por fuente.

Contaminante	Fuente
Óxidos de azufre	Combustión del carbón y petróleo <ul style="list-style-type: none"> - Automóviles - Calderas - Centrales térmicas - <i>Explotación minerales de azufre</i> - Fabricación sulfúrico y otros
Sulfuros y mercaptanos	Refinerías Procesos industriales Putrefacción de aguas y basuras Fabricación de papel, pasta etc.
Monóxido de carbono	Combustión incompleta <ul style="list-style-type: none"> - Motores de gasolina - Centrales eléctricas - Acerías - Calefacciones - Humo de cigarrillo
Dióxido de carbono	Combustión productos orgánicos
Hidrocarburos	Combustión Motores de gasolina Evaporación zonas petrolíferas
Ozono	Reacciones fotoquímicas (zonas urbanas)
Óxidos de nitrógenos	Combustión a altas temperaturas <ul style="list-style-type: none"> - Motores de combustión interna (diesel) - Centrales eléctricas - Fabricas de explosivos - Volcanes y tormentas
Mercurio	Minería Evaporación Construcción
Fluoruros	Industrias de cerámicas, abonos. Obtención del aluminio
Polvo	Erosión eólica Terremotos y volcanes Minería Agricultura Industria del cemento

4.1.4. Fuentes de Contaminación Atmosférica

El hombre y su actividad contaminan el aire por medio de plantas termoeléctricas, automóviles y aerosoles produciendo SO_x , NO_x y COV respectivamente. Los COV también están asociados con fuentes naturales, principalmente de la vegetación cuando existe alta densidad de esta. Otras fuentes con importancia para el calentamiento global y el debilitamiento de la capa de ozono son CO_2 , CH_4 , N_2O cuyo origen son naturales y antropogénicos en proporciones similares (Huggett, 1997).

4.1.4.1. Emisiones Industriales. Llamadas también fijas. En forma general son debido a la quema de combustibles fósiles, emisiones de químicos y la liberación de partículas inertes por medio de las condiciones ambientales. Se consideran más de 70 000 compuestos químicos que influyen en el ecosistema.

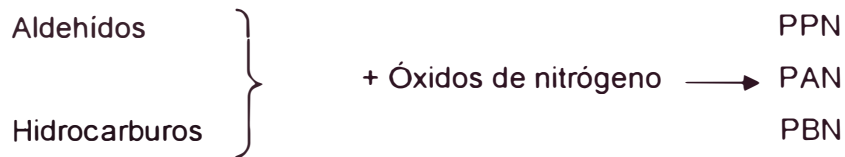
4.1.4.2. Emisiones por Vehículos Motorizados. Conocidas como móviles cuando los motores tienen mecanismos de transportación. Liberados en la combustión del combustible y liberados a la atmósfera en formas de CO, NO_x , SO_x , plomo, material particulado, ozono, etc.

4.1.4.3. Contaminación en Hogares. Denominada también areal. La turgurización urbana emite cantidades importantes de aerosoles, anticongelantes, aromatizantes, incineración de residuos sólidos, insecticidas. Por otro lado existe un uso indiscriminado de fuentes de energía no renovables que crean *un efecto sinérgico entre estos contaminantes.*

4.1.5. Sinergias entre Contaminantes

Los contaminantes emitidos a la atmósfera tienden a reaccionar entre sí aumentando la capacidad tóxica de sus productos, sobre todo cuando se encuentran próximos a zonas altamente industriales. La interacción entre estos agentes integran reacciones fotoquímicas, óxido reducción, catálisis, polimerización, etc.

Se indica a continuación los principales casos de sinergias:

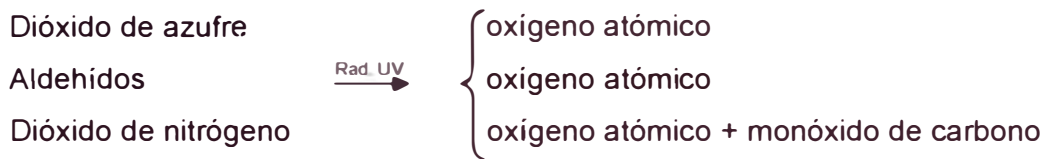


Dióxido de azufre + ozono

Smog ácido (Londres)

Smog oxidante (Los Ángeles, Países Bajos, Fos)

Dióxido de azufre + agua \longrightarrow ácido sulfuroso

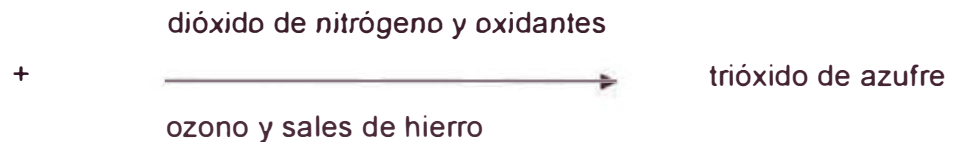


Oxígeno atómico + oxígeno molecular \longrightarrow ozono

Monóxido de nitrógeno + oxígeno molecular \longrightarrow trióxido de nitrógeno

Trióxido de nitrógeno + oxígeno molecular \longrightarrow dióxido de nitrógeno + ozono

Dióxido de azufre



Oxígeno molecular



Dióxido de azufre + ácido sulfúrico

Ácido fluorhídrico + sulfato de berilio



Ozono + agua	oxigenada
Diversos gases +	{ polvo orgánico
	{ polvo inorgánico
	{ Humos

Monóxido de carbono + etileno

Ozono + polen de gramíneas → aumento de alergias (fiebre del heno)

Amianto + humo de tabaco → aumento de cáncer pulmonar

Ozono + NO_x + PAN + luz solar → afectan a la respiración

Humo del tabaco + radón + partículas de radio → daño pulmonar

Hidrocarburos policíclicos + ciertos disolventes → acción tóxica

Humo del tabaco + radón → aumenta riesgo cancerígeno

CO + ruido → potencia el efecto del ruido en el oído interno

Benceno + campos electromagnéticos → más casos de leucemia aguda

Plaguicidas + campos electromagnéticos → más casos de leucemia aguda

Benzopireno + radiaciones microondas → mayor incidencia de tumores

Radón + radiación electromagnética → mayores efectos de radiación

(Seoáñez, 2002).

4.1.6. Efectos de la Contaminación Atmosférica

4.1.6.1. **La Lluvia Ácida.** El término "lluvia ácida" surgió hace más de un siglo, concebido por el químico inglés Robert Angus Smith, cuando analizaba el aire de Manchester. En 1872 escribe sobre las consecuencias de las precipitaciones cargadas con ácidos, donde anota los efectos: la anemia de las plantas, la corrosión de las superficies metálicas y la toxicidad presentes en la lluvia (Kuroiwa, 2002). Es de tipo inodoro e insípido al igual que el agua pero sus efectos son de índole indirecta por la carga de contaminantes tóxicos que contiene y que ingresan al organismo por las vías conocidas. Sin embargo, no es el daño al organismo humano lo que cautiva la atención inmediata, sino los signos de cambio en las construcciones y demás estructuras antropogénicas. No existe aún consenso entre los científicos sobre los efectos de la mencionada lluvia ácida en los bosques, aunque concuerdan en el hecho que esta contaminación afecta ciertos mecanismos biológicos de las plantas

haciéndolas más propensas a enfermedades e inclemencias climáticas. “La lluvia ácida afecta las hojas de los vegetales, despojándolas de su cubierta cerosa y provocando pequeñas lesiones que alteran la acción fotosintética”. Por otro lado la acción de estos agentes contaminantes altera el metabolismo del vegetal haciendo que este pierda sus hojas y por consiguiente disminuya su capacidad de ingerir nutrientes. Asimismo este tipo de lluvia actúa como vehículo para la absorción de algunos elementos químicos, por ejemplo el aluminio, que bloquea la asimilación de nutrientes a través de la raíz (Lomeli, Tamayo e Illaraza, 2000). Cuando los suelos de las regiones con alcalinidad alta fallan en el intento de neutralizar la acidez, esta ataca la biota removiendo nutrientes esenciales como el calcio y el magnesio, además de promover la absorción de metales como el aluminio, considerado altamente tóxico (Kuroiwa, 2002).

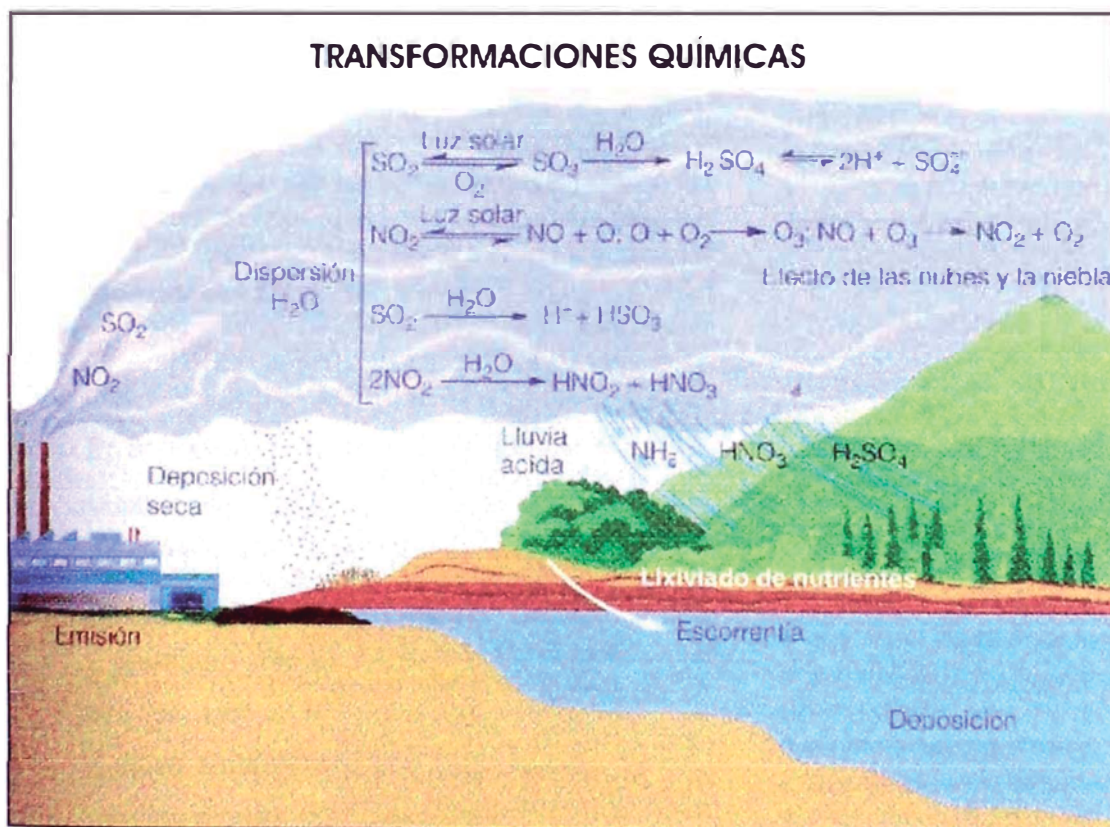


Figura 4.28. Dinámica de la formación y acción de la lluvia ácida.

Los efectos de la lluvia ácida pueden extremarse si la zona en cuestión se encuentra en regiones donde la niebla actúa como herramienta que permite

mayor tiempo de contacto. Por ello los cultivos emplazados en estas zonas deben ser abonados con fertilizantes que restituyan nutrientes y titulen la acidez. Asimismo, algunos tipos de suelo como el calizo, sirve como amortiguador del pH tendiente a cero cuando la estequiometría así lo permite.

Los efectos en la fauna son menos pasivos que en la flora, debido a los rápidos cambios que producen. La mayoría de ellos tiene una mayor sensibilidad a la acidez, fluctuando de 4 en el caso de la rana, hasta 6 como es el caso de la lombriz. Pero la mayoría de la biota sucumbirá con pH bajo 5.5 logrando sobrevivir solo algunos tipos de algas.

La formación de la lluvia ácida obedece a la interacción de SO_2 , NO , NO_2 , CO , CO_2 , NH_3 , entre otros, que al reaccionar con el vapor de agua producen iones o ácidos. Este proceso es debido a que el agua al poseer un $\text{pH} = 7$ a 25°C a 1 atm de presión alcanza la ionización de hidrógeno, protones, oxidrilo, cada uno con concentraciones de 10^{-7} moles/l. Este proceso sería la explicación de la ligera acidez del agua al encontrarse con CO_2 variando entre 5.7 y 7, por otro lado en zonas con contenidos considerables de H_2SO_4 y HNO_3 llega incluso entre 3 y 5. Así también ocurren estas reacciones con SO_2 y NO_x en locaciones cercanas a termoeléctricas, tráfico excesivo y algunas otras industrias.

El SO_2 se encuentra naturalmente en la atmósfera en cantidades inocuas. El dióxido de azufre antropogénico existe debido a la combustión de carbón, petróleo y sus derivados. Las principales fuentes emisoras este gas son las centrales de energía eléctrica, calderas industriales y las fundiciones de cobre y aluminio. Hasta la década pasada se calculó que la emisión anual de SO_2 era de 146×10^6 toneladas, y que las variaciones de las concentraciones medias anuales de este compuesto en áreas urbanas son $0.1 - 0.2 \text{ g/m}^3$ y las medias diarias más elevadas $0.3 - 0.9 \text{ g/m}^3$.

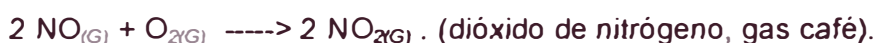
En el planeta, los óxidos de nitrógeno se producen naturalmente por acción bacteriana y volcánica, y por la energía eléctrica de los rayos, en cantidades muy superiores a las generadas por la actividad humana. Sin embargo las

concentraciones en la atmósfera son muy pequeñas debido a la distribución homogénea en toda la superficie terrestre. Varían entre 0.4 y 9.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ determinado por la OPS en los años 90. Asimismo los óxidos de nitrógeno (NO , NO_2) de fuentes por actividades humanas se forman durante la combustión del petróleo y sus derivados. Son en su generalidad emitidos con hidrocarburos gaseosos, por centrales de energía eléctrica, calderas industriales y toda clase de vehículos con motores a gasolina. Las concentraciones anuales medias de dióxido de nitrógeno en zonas urbanas mundiales oscilan entre 20 y 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Según la OPS en reportes del año 1986 los promedios mensuales más elevados 60 - 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, los promedios diarios más elevados 30 - 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y los horarios más elevados 240 - 850 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Kuroiwa, 2002).

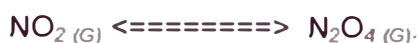
La lluvia ácida es formada por las siguientes reacciones:



Las reacciones químicas directas del nitrógeno generalmente requieren altas temperaturas, debido a su poca reactividad química. Su reacción con el oxígeno puede efectuarse usando una descarga eléctrica de alto voltaje:



El dióxido de nitrógeno existe en equilibrio con su dímero, el tetraóxido de dinitrógeno, N_2O_4 , que es un gas incoloro y se licua a 21.3°C.

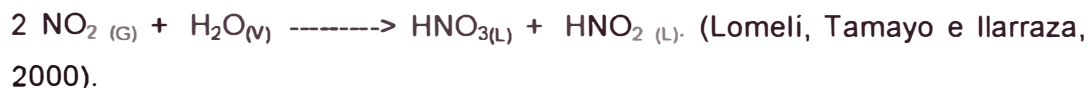


El dióxido de nitrógeno se descompone por la acción de la luz solar en óxido nítrico y oxígeno atómico (es muy reactivo).



El dióxido de nitrógeno se combina con el agua produciendo ácido nítrico y óxido nítrico o ácido nítrico y ácido nitroso, según la cantidad de dióxido de nitrógeno que reaccione con el agua:





Efectos palpables de la lluvia ácida se observan en algunos lugares del mundo como en Suecia, en las riberas del río Atran, donde se pescaban hasta 10 000 ejemplares de salmón al año, actualmente no llega ni a la décima parte. En Alemania la lluvia ácida aniquiló el 50% de los pinos. Con la ayuda de la UE se realizaron costosos proyectos de recuperación de estos bosques pero en algunas áreas el daño es irreparable. Otras zonas más cercanas a nuestra realidad es la de Cubatao, Sao Paulo, conocido como el “valle de la muerte”. La vida en los cuatro ríos que la atraviesan es inexistente, los árboles se caen y los pastizales no pueden crecer. Por otro lado se ha demostrado en estudios realizados por el gobierno central que en el área afectada se han detectado malformaciones congénitas, enfermedades respiratorias y malestares cardiacos. Las fuentes con mayor capacidad de emisión de gases son los 22 complejos petroquímicos y siderúrgicos que están establecidos en el lugar (Kuroiwa, 2002).

4.1.6.2. El Efecto Invernadero. El planeta tierra retiene en su superficie las masas de agua y aire debido a la fuerza de gravedad que posee, el movimiento de ellas es posible por la energía del sol, que emite en todas direcciones un flujo de luz visible o próxima a la radiación visible, en las zonas ultravioletas e infrarrojas. Se sabe (Carnot) que la transformación de la energía térmica en mecánica no puede ser total. Un motor térmico requiere de una fuente caliente que suministre la energía térmica y una fuente fría que la reciba. En el caso de la Tierra la fuente que suministra la energía térmica es la superficie del suelo calentada por la radiación solar y la fuente fría está localizada en las capas altas de la atmósfera, esta se enfría en forma continua por la pérdida de energía en forma de radiación infrarroja emitida por el suelo en caliente hacia el espacio sideral.

Sólo una porción de energía recibida por el sol es utilizada, de modo que la atmósfera transforma la energía de la radiación solar en energía mecánica del viento. La fuente de calor para la atmósfera es la superficie del suelo

calentada por la luz solar que luego es emitida como radiación infrarroja hacia el espacio.

El calor entonces, es parcialmente contenido en la atmósfera por una mezcla de gases llamados “gases de efecto invernadero” los cuales conforman apenas el 1% del aire (CH_2 , H_2O , O_3 , CH_4 y CFC's). Estos gases son parcialmente opacos a las radiaciones infrarrojas, es decir, absorben a las radiaciones infrarrojas emitidas del suelo que ha sido calentado por la luz solar. También Tyndall (1859) descubrió que ni el O_2 ni el N_2 tenían la capacidad de producir el efecto invernadero, pero que por otro lado, el CO_2 absorbe una gran cantidad de energía y que su concentración varía de manera natural debido a diferentes fenómenos, entre los que se encuentran la fijación orgánica que realizan las plantas. Un desbalance en la concentración del dióxido de carbono provocaría el descenso de las temperaturas en el planeta.

Cuando la radiación infrarroja entra en contacto con las moléculas opacas mencionadas es absorbida por ellas. La vibración de estas moléculas por causa del paso de la radiación emite energía en forma de rayos invisibles e infrarrojos promoviendo lo que se conoce como efecto invernadero

4.1.7. Partículas Totales en Suspensión

“Las partículas totales en suspensión (PTS) son definidas como todas las partículas cuyo diámetro aerodinámico equivalente es inferior a $100 \mu\text{m}$ ” (Secretaría General del Medio Ambiente, 2006). Estas partículas son una compleja mixtura de sólidos y líquidos los cuales están formados de una variedad de componentes, incluyendo ácidos (nitratos y sulfatos), químicos orgánicos, metales, suelo y partículas de polvo. Con respecto al tamaño de las partículas, la capacidad de provocar mayores daños a la salud dependerá de cuanto pueda viajar la partícula en el sistema respiratorio, es decir mientras más diminutas sean, mayores problemas causarán. La Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) ha desarrollado programas para estudiar las partículas menores a $10 \mu\text{m}$ en diámetro porque son estas las que generalmente viajan a través de la cavidad bucal y fosas nasales ingresando a

los pulmones. Una vez inhaladas las partículas, pueden afectar seriamente el corazón y los pulmones, por ello se han separado en dos grupos: las partículas gruesas sujetas a inhalación, las que se pueden hallar en caminos e industrias que emitan polvos, son mayores que $2.5 \mu\text{m}$ y menores que $10 \mu\text{m}$ en diámetro; y las partículas finas, aquellas encontradas en humos y neblinas, de diámetros inferiores a $2.5 \mu\text{m}$ y que pueden ser formadas cuando los gases emitidos de plantas de energía, industrias y automóviles reaccionan en el aire (EPA, 2006).

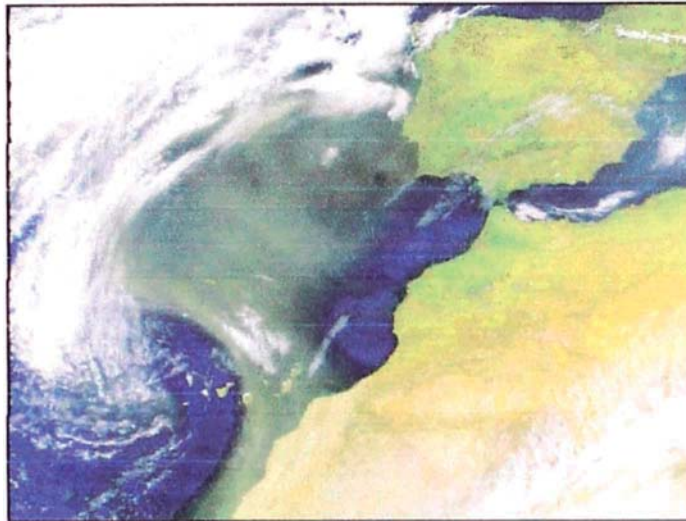


Figura 4.29. Invasión de material particulado africano registrada el 05/03/98 (imagen satélite facilitada por SeaWiFS Project, NASA GSF y ORBIMAGE)

Este compuesto prevalece en la atmósfera a partir de emisiones directas o transformaciones físicas o químicas de los contaminantes gaseosos. Las mayores fuentes del material particulado son: la combustión de compuestos fósiles, procesos industriales, transportación, erosión del suelo a causa del viento y reacciones fotoquímicas (Ho et al., 2005).

El material particulado respirable se ha clasificado de acuerdo a su tamaño: PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, y $\text{PM}_{0.1}$. El primero es aquel que está compuesto por partículas gruesas en su mayoría de pH básico producto de la combustión no controlada. El segundo tamaño, agrupa partículas por lo general ácidas, que contienen hollín y otros derivados de las emisiones vehiculares e industriales, éstas son las que el 100% se alojan en bronquios, bronquiolos y alvéolos (EPA, 2006).

El tercero en la lista es denominado partículas ultrafinas y forman parte de la fracción de $PM_{2.5}$, estas partículas se forman en gran medida a partir de gases a través de un proceso llamado nucleación, que es la etapa inicial en la que el gas se convierte en partícula. Pueden alcanzar el tamaño de $1 \mu m$, ya sea por condensación de gases o por coagulación, cuando dos o más partículas se combinan para formar una mayor (WHO, 2006).

Según la etapa de formación se clasifican en: material particulado primario, que son partículas sólidas, aerosoles, o humos emitidos directamente como partículas o gotas condensadas; asimismo, el material particulado secundario es referido a las partículas producidas en el aire por reacciones químicas entre gases (SO_2 , NO_x , COV).

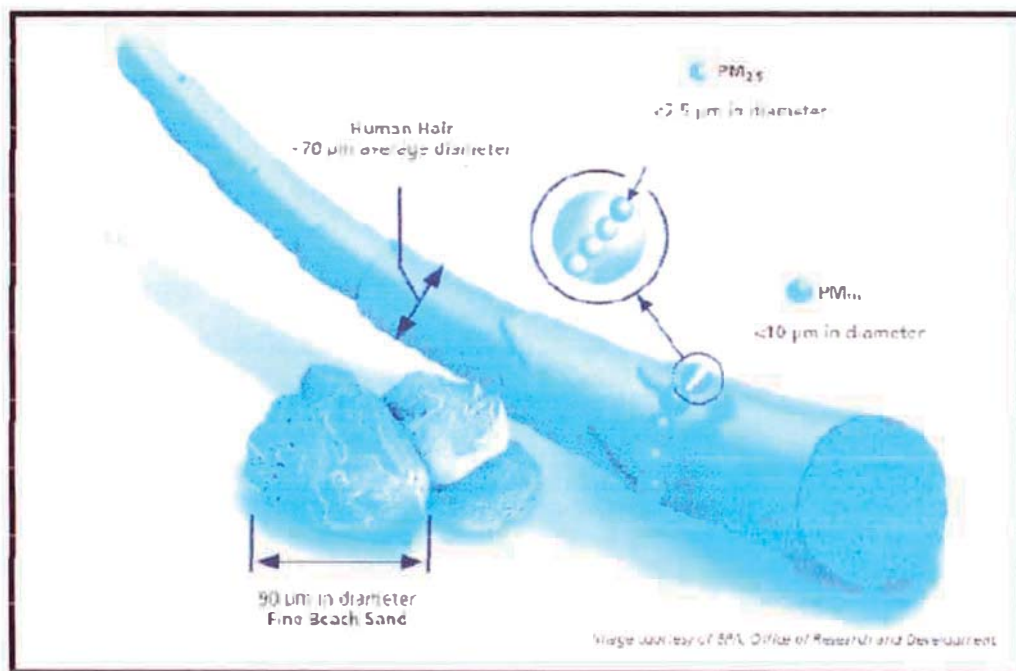


Figura 4.30. Imágenes comparativas de las partículas respirables

Con la denominación de partículas totales en suspensión (TPS, por sus siglas en inglés) se incluyó toda la variedad de contaminantes en forma de partículas sólidas y líquidas del aire, primarias como el polvo y hollín; y secundarias como aquellas partículas líquidas producidas por la condensación de vapores.

4.1.7.1. Principales Fuentes, Orígenes y Causas del Material Particulado. En la naturaleza puede formarse en distintos fenómenos: viento, polinización, e incendios forestales. Las fuentes antropogénicas de estas partículas radican en la quema de combustibles sólidos, como la madera y el carbón, las actividades agrícolas, como la fertilización, almacenamiento de granos y la industria de la construcción. Como se ha mencionado con anterioridad, el material particulado consiste en el polvo fino, el hollín, el humo y las gotitas formadas por reacciones químicas; todas las mencionadas producidas cuando se queman combustibles como carbón, madera o derivados de los hidrocarburos. Estas partículas, entonces, provienen de vehículos motorizados, de la generación de energía y de instalaciones industriales. Además son fuentes de las mencionadas: chimeneas, estufas de leña, caminos no pavimentados, operaciones de trituración y pulverización cuando se transportan por masas de viento con velocidades variadas (EPA, 2006).

En términos generales las fuentes de PM_{10} radican en el polvo movido por el viento en zonas áridas, vehículos que atraviesan caminos no pavimentados y operaciones de aplastado y trituración. Los PM_{25} pueden provenir de la combustión de combustibles (automóviles, plantas industriales y de generación de energía, etc.) y del polvo fugitivo. Estas se forman principalmente en la atmósfera a partir de gases como SO_x , NO_x y VOC's. El material particulado en suspensión a diferencia de otros contaminantes es emitido por una gran variedad de fuentes las cuales otorgarán características diversas a las partículas, como: tamaño, densidad, superficie específica, etc., además de su composición química.

4.1.7.2. Clasificación

Responde a distintos criterios.

- a. **Por el Mecanismo de Formación.** Pueden ser clasificadas según su *mecanismo de formación como partículas primarias o secundarias.*
 - *Partículas Primarias.* Aquellas vertidas directamente a la atmósfera desde la fuente de emisión.

- *Partículas Secundarias.* Aquellas que se forman a partir de las emisiones de sus precursores gaseosos.
- b. **Por Fuentes de Emisiones.** Las fuentes de emisiones de material particulado causadas por el hombre son:
- *Fuentes de Punto.* Definidos por su localización: fábricas de metales, combustión, fuentes de generación eléctrica, industrias, etc.
 - *Fuentes de Área.* Variadas y dispersas para tratarlas en forma individual: quemas, construcción, carreteras (con y sin pavimento), etc.
 - *Fuentes Móviles.* Las que son no estacionarias: vehículos de motor, equipo de agricultura, etc (Economopoulos, 2005).

4.1.7.3. Presencia en el Ambiente

- a. **Naturales.** En lo que respecta a las partículas naturales destaca la *fracción mineral*, las cuales son emitidas como fugitivas de los suelos. La composición química de estas partículas varía con respecto a la edafología de la zona, en términos generales: calcita (CaCO_3), cuarzo (SiO_2), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), arcillas (sobre todo caolinita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, e illita $\text{K}(\text{Al,Mg})_3\text{SiAl}_{10}(\text{OH})$), feldespatos (KAlSi_3O_8 y $(\text{Na,Ca})(\text{AlSi})_4\text{O}_8$) y cantidades inferiores de sulfato cálcico ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y óxidos de hierro (Fe_2O_3), etc. Estos tipos de partículas pueden originarse en desiertos y emisiones volcánicas, además los mares representan también una fuente de partículas generadoras de aerosol marino. La *fracción primaria* generalmente compuesta por cloruros: cloruro de sodio (NaCl) y sulfato de magnesio o potasio (MgSO_4 o K_2SO_4).



Figura 4.31. Partículas naturales.

- b. **Antropogénicas.** Ubicadas principalmente en zonas urbano-industriales. Una de las principales fuentes de estas partículas son las emisiones producidas por los vehículos motorizados, el desgaste del pavimento, neumáticos y frenos. Asimismo las actividades industriales en las que se usa la combustión del carbón como fuente de energía, a su vez emite materia particulada primaria. La fundición de metales (cobre, cinc, etc.), la producción de cemento, cerámica o ladrillos son también fuentes de estas partículas. Además de las partículas primarias emitidas en las chimeneas, en determinados procesos industriales se producen mediante la manipulación de las mismas en materiales pulverulentos, a estas se les denomina fugitivas. Otras fuentes asociadas a la manipulación de material son las actividades de construcción, minería, determinados procesos en la fabricación de cerámicas o cementos, o la emisión fugitiva durante el transporte.

Con respecto a las partículas secundarias antropogénicas la división está vinculada a sulfatos, nitratos y aerosoles secundarios. El mecanismo principal de formación de sulfatos es la oxidación del SO_2 . Las fuentes de amonio, en su mayoría, se encuentran en la agricultura y en algunas formas de producción industrial. Con respecto a los nitratos los más importantes son los óxidos de nitrógeno (NO_x), emitidos por automóviles, industrias y plantas de producción eléctrica. Por otro lado, Odum et al. sostiene en estudios realizados en 1996 y 1997, que los hidrocarburos que hacen de precursores gaseosos de aerosoles orgánicos secundarios

tienen su origen en fuentes vegetales, como las grandes extensiones de cultivos, quema de biomasa o combustibles fósiles. Así también son importantes los hidrocarburos no metálicos aromáticos pues son precursores de aerosoles orgánicos secundarios originados en la gasolina.

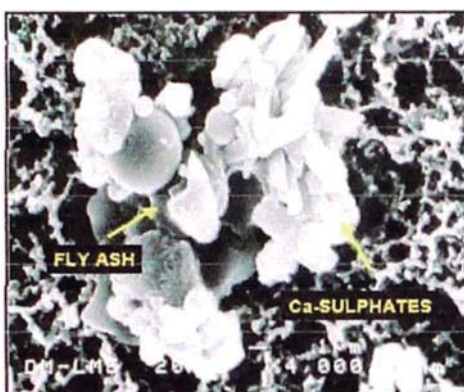


Figura 4.32. Partículas antropogénicas

4.1.7.4. Efectos en el Ambiente

Estos efectos pueden ser visibles cuando la contaminación por partículas cause bruma reduciendo la visibilidad en lugares donde se supone claridad, como parques, bosques, medios acuáticos, etc. Las partículas del estudio pueden permanecer en el aire y viajar distancias considerables incluso de cientos de kilómetros. Estos pueden causar daño a la vegetación por causa de las partículas, lluvia y niebla ácidas y los oxidantes fotoquímicos, tanto en los bosques como en las zonas agrícolas.

Producen también efectos sobre las condiciones atmosféricas provocando reducción de la visibilidad, formación de niebla y precipitación, disminución de la radiación solar y alteración de la temperatura, así como la distribución de los vientos. El efecto más evidente es la disminución de la visibilidad, resultado de la absorción y dispersión de la luz que provocan las moléculas de gas y partículas. Esta absorción de diferentes longitudes de onda es la que provoca las coloraciones en la atmósfera. No obstante es la dispersión de luz el principal fenómeno del deterioro de la visibilidad.

La contaminación afecta las zonas urbanas por medio de la formación de niebla y decremento de la recepción de la radiación solar. La formación de niebla, como es de suponer, es mayor en zonas urbanas que en rurales a pesar que la temperatura del aire tiende a ser más alta y la humedad relativa más baja en las ciudades que en el campo. Se puede explicar este fenómeno mediante el mecanismo de formación de la niebla. Cuando existen altas concentraciones de dióxido de azufre, por señalar un ejemplo, las gotas de ácido sulfúrico formadas por la oxidación del dióxido sirven como núcleo de condensación para la formación de niebla. Asimismo, se ha asociado el aumento de precipitaciones en áreas con alta concentración de partículas.

Las partículas arrastradas y depositadas en espejos de agua generan turbidez la cual realiza un consumo importante de oxígeno. Las fuentes de contaminación en el agua por materia particulada son: polvo atmosférico removido por lluvias, contacto con tierras, fibras de plantas, algas, residuos, etc. La calidad de las aguas por efecto de las partículas en suspensión en su medio puede variar en ciclos de tormentas por elevarse la concentración de arena inorgánica, en verano cuando la cantidad de arena disminuye considerablemente pero se incrementa la población de algas y organismos acuáticos. Otros efectos es la reducción de la actividad de los microorganismos que dependen de la luz solar cuando el agua presenta turbidez, puede captar también plomo debido a la emisión de motores, bacterias, virus y metales pesados tóxicos (CIDA, 2003).

4.1.7.5. Efectos en la Salud

Estudios desarrollados sobre el efecto del material particulado en el deterioro del sistema respiratorio y cardiovascular señalan que los efectos resaltantes son: agudización del asma y enfermedades cardíacas y pulmonares; admisiones al hospital y visitas a la sala de emergencias por problemas respiratorios, síntomas respiratorio agudos, incluyendo dolor de pecho, jadeo y tos; disminución de la función pulmonar traduciéndose en falta de aire, bronquitis crónica, muerte prematura, etc.

La población más susceptible a estos trastornos son los ancianos y niños. Además las personas con enfermedades cardíacas o pulmonares pueden desarrollar complicaciones por la inspiración de estas partículas.

4.1.7.6. Material Particulado Respirable con Diámetro Aerodinámico de 10 μm (PM_{10})

Como se ha mencionado en el documento, el efecto adverso a la salud al respirar las partículas será directamente proporcional al decremento del tamaño de estas, por motivo del grado de penetración que tenga en el sistema respiratorio. La mayoría de las partículas con diámetro aerodinámico superior a 5 μm se depositan en las vías aéreas superiores (nariz), tráquea y bronquios. Los efectos a dosis prolongadas de este agente son: aumento de la probabilidad de padecer cáncer pulmonar, muerte prematura, síntomas respiratorios severos, irritación de ojos y nariz, agravamiento en pacientes con asma. Asimismo, una vez acumulados en los pulmones se originan enfermedades como silicosis y asbestosis (neumoconiosis).

4.1.7.7. Material Particulado Respirable con Diámetro Aerodinámico de 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$)

Esta porción de partículas se considera más dañina a la salud que la anterior clasificación debido al grado de penetración y permanencia que tienen en el sistema respiratorio. Este tipo de partículas tienen mayor probabilidad de depositarse en los bronquiolos y alvéolos a medida que su tamaño disminuye.

Entre los efectos a la salud inducidos por el ingreso de estas partículas al organismo tenemos: aumento en la frecuencia de cáncer pulmonar, muertes prematuras, síntomas respiratorios de insuficiencia respiratoria severa, irritación de ojos y nariz, silicosis, asbestosis, agravamiento de asma y enfermedades cardiovasculares (FAO, 1986).

Los porcentajes de iones solubles en agua de estas partículas finas son en 50% sulfatos, nitratos y amonio; lo que indica que la otra mitad se forma en la atmósfera (Hu et al., 2002).

4.1.8. Material Particulado con Diámetro Aerodinámico Inferior a 10 μm (PM_{10})

Es el material particulado con diámetro de una esfera de 1 g/cm^3 de densidad, con la misma velocidad terminal que la partícula debido a la fuerza gravitacional en el aire en condiciones predominantes de temperatura, presión y humedad relativa, inferior a $10 \mu\text{m}$ (FAO, 1986). Se encuentra como una mezcla heterogénea de sustancias químicas y partículas de diversos tamaños, directamente emitidas al aire tales como hollín de diesel, polvo proveniente de caminos o de trabajos agrícolas, o partículas inherentes a la quema de madera o procesos industriales. Producido también a través de reacciones fotoquímicas en las cuales participan gases tales como los óxidos de azufre o los óxidos de nitrógeno generados por la combustión de combustibles (Ostro, 1998). Este material particulado proveniente de fuentes naturales de características desérticas está constituido generalmente de cuarzo, calcita, con trazas de dolomita y arcilla, dependiendo del tipo de suelos que sirvan como fuente. Los mayores constituyentes de zonas desérticas como el Cairo son Si y Ca, y los menores Al, Fe, Mg, K y Na. Las concentraciones altas de Cl y Na pueden ser entendidas como derivadas del mar y el contenido de Al, Zn, Mn y Fe, está relacionado con fuentes derivadas de los suelos polvorientos (Elminir, 2005). Los elementos Si y Ca son considerados componentes de la corteza terrestre. La presencia del silicio grueso puede atribuirse a la erosión del desierto y actividades relacionadas con la construcción (Elminir, 2005). Otro elemento que puede conformar el PM_{10} a partir de la corteza terrestre cuando esta es influida por vientos es el Ti; por otro lado, los que son emitidos por fuentes antropogénicas como NO_x , SO_4 no proveniente del mar, V, Ni, Cu, Cd y Cr (Xie et. al, 2004). El agua también puede formar parte del material en estudio, dependiendo de la composición química, puede ser absorbida con facilidad por sales inorgánicas como el sulfato de amonio y nitrato de amonio. Las sales inorgánicas con sólidas hasta que la humedad relativa del ambiente permita que las sales se vuelvan líquidas. Si la humedad relativa del ambiente decrece la evaporación del agua ocurre, mientras que las sales no cristalizan en este punto (Karar et al., 2006). Si la humedad relativa del ambiente decrece entonces la evaporación de agua absorbida ocurre. No obstante las sales no cristalizan en los puntos de licuefacción sino que se mantienen

hipersaturadas hasta un punto de variación física muy bajo (punto de cristalización) (Hueglin, 2004).

Las variaciones de PM_{10} en el ambiente pueden estar relacionadas a fuentes antropogénicas, rugosidad de la superficie y condiciones meteorológicas, así como la distribución en la conversión gas-partícula favorecidos por la humedad relativa alta (Karar et al., 2006).

Desde 1990 hasta el 97 el material particulado inferior a $10\ \mu m$ en diámetro (PM_{10}) fue el indicador utilizado por EPA para establecer estándares de salud concernientes a exposiciones agudas y crónicas. Algunos de las consideraciones usadas por esta entidad comprenden:

- La respuesta biológica a las partículas que penetran y son depositadas en varias regiones del tracto respiratorio y los posibles riesgos generados por la inhalación.
- Las partículas depositadas en el tórax (tráquea, bronquios y regiones alveolares) son las que comprometen en mayor medida la salud.
- Las partículas depositadas en otras regiones del cuerpo presentan un riesgo relativamente bajo. (Department of Natural Resources, 2005)

Cuando el Congreso pasó la Ley de Aire Limpio en 1990 (Clean Air Act, por sus siglas en inglés) donde EPA sostuvo las partículas de 10 micrómetros como un indicador del estándar, por motivo de su capacidad de ingreso a las vías respiratorias. En 1997 la EPA cambió el énfasis a $PM_{2.5}$.

Existen en la atmósfera partículas que conservan volumen y morfología diferentes, pueden ser sólida o líquida. Los autores concuerdan que para efectos epidemiológicos y de calidad ambiental estas partículas se pueden dividir según el diámetro que poseen, así, se separan en 1 (estudios recientes), 2.5 y $10\ \mu m$.

Las partículas ásperas (PM_{10}) pueden estar conformadas de humo, tierra y polvo tóxico de las fábricas; provenientes del alza de polvo de los caminos por el pase de vehículos motorizados, así también pueden contener mohos, esporas y polen. Por otro lado las partículas finas ($PM_{2.5}$) están conformadas por compuestos orgánicos, metales pesados; son producidas en la combustión de materiales, fundiciones, refineries, etc. El radio de acción de estas partículas varía con respecto a su tamaño y peso. Las partículas PM_{10} pueden permanecer en el aire por minutos u horas, por otro lado las $PM_{2.5}$ por días o semanas. Las primeras pueden viajar alrededor de 100 m y en casos extremos hasta 50 Km. Las partículas de 2.5 pueden viajar cientos de kilómetros.

4.1.8.1. Efectos en la Salud

Para comprender el efecto de las partículas en el organismo es necesario reseñar el funcionamiento de los sistemas en contacto con estas partículas.

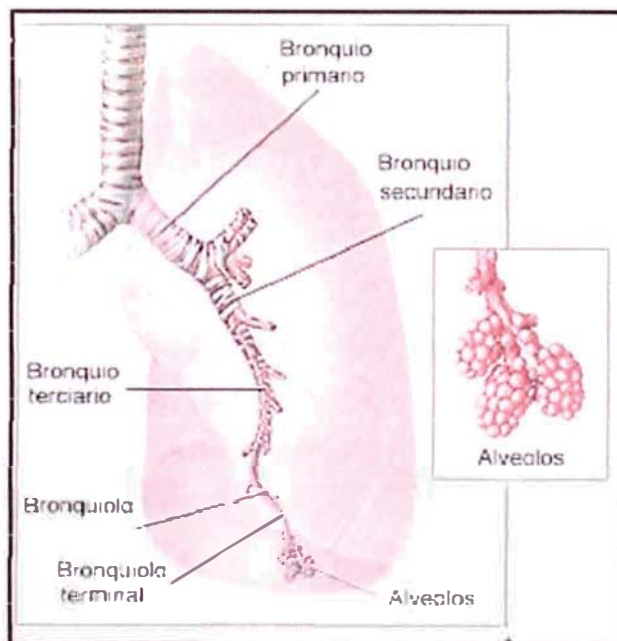


Figura 4.33. Conductos respiratorios del pulmón. Recuperado el 12 de marzo de 2008, de www.cepvi.com/medicina/imagen/pulmon2.jpg.

El pulmón humano con un área de 40-120 m² está constantemente expuesto entre 10 000 y 20 000 L de aire ambiental diariamente. Los mecanismos de

defensa del pulmón son usualmente adecuados cuando se trata de controlar partículas grandes depositadas en su superficie, estos consisten en remoción mecánica y en neutralización bioquímica. Las partículas más grandes depositadas en las áreas de conducción como la tráquea y los bronquios son enviados hacia afuera por el sistema de limpieza mucociliar llevándolas a la garganta para ser finalmente dispuesto por el sistema digestivo, mientras que las partículas más diminutas que consiguen llegar hasta el área de absorción del oxígeno son removidas por células llamadas macrófagas, las cuales pueden conducir las partículas fagocitadas hacia las vías respiratorias donde el sistema mucociliar se encarga de su tratamiento o son transportadas a través de la pared alveolar hacia los canales internos de evacuación de los pulmones, las vesículas linfáticas que drenan en los nodos de linfa, donde pueden permanecer en un estado inerte, o ser transportados a la sangre. Las partículas presentes en el ambiente pueden contener metales en transición capaces de generar moléculas reactivas de oxígeno que producen daño a las células en contacto con la membrana mucosa. Estas sustancias oxidantes son rápidamente neutralizadas por antioxidantes que son secretados por las células epiteliales que se encuentran adheridas al tracto respiratorio o que se difunden pasivamente desde el plasma hasta el fluido de cobertura respiratorio.

A pesar de la capacidad del pulmón para deshacerse de estas partículas, los mecanismos de limpieza pueden sucumbir ante una sobrecarga de estos agentes o las cualidades tóxicas inherentes. En pacientes con deficiencias en el sistema mucociliar o funciones anormales inmunológicas, incluso una carga pequeña de partículas pueden ser suficientes para causar efectos perjudiciales en los pulmones. Los estudios indican una relación directa con los índices de alta concentración de partículas y mortalidad, exacerbaciones de asma, bronquitis crónica, infecciones del tracto respiratorio, enfermedades isquémicas del corazón y derrames.

Uno de los mayores factores para determinar la toxicidad de las partículas inhaladas es las características de su dosimetría, lo que incluye la capacidad de deposición, evacuación, retención, transportación, y disolución en las

diferentes regiones del pulmón. La dosis de las partículas inhaladas y el lugar de su deposición en el pulmón varían de acuerdo al diámetro aerodinámico, morfología, patrones de respiración y estructura del pulmón. Generalmente, de la misma forma como el tamaño de la partícula y el ritmo de respiración se incrementan, la deposición de estas partículas se realizan en las áreas proximales; por otro lado las partículas diminutas son introducidas con mayor profundidad cuando su tamaño disminuye y con ritmos de respiración lentos. Los tamaños de las partículas pueden variar desde algunos nanómetros hasta decenas de micrómetros, entre estas medidas se encuentran las PM_{10} las cuales tienen la capacidad de depositarse en los alvéolos, las otras de mayor diámetro aerodinámico son removidas al sistema mucociliar. Los estudios realizados demuestran que las partículas inferiores a $2.5 \mu m$ tienen un 83% de deposición total, mientras que las que se encuentran en 8.2 y $11.5 \mu m$ entre 49 y 31%. En forma similar, las partículas de menor tamaño tienden a ser retenidas en el pulmón por lapsos mayores (77% de retención para partículas de $2.5 \mu m$ comparadas con 15% con las de diámetro de 8.2 después de 24 horas). Esta dinámica de acumulación se aplica incluso en vías obstruidas, como las que presentan asma bronquial o problemas estructurales. Se ha observado que pacientes con problemas de vías respiratorias obstruidas y geometría anormal sufren mayores daños que los normales por causa de estas partículas. La reducción del 30% de las vías de respiración aumenta un 100% la deposición.

La mayoría de partículas obtenidas de atmósferas urbanas se encuentran entre 0.05 y $0.2 \mu m$. Las partículas ultrafinas (menores de $2.5 \mu m$) contienen en un 50% carbón y 50% sales, mayormente sulfato de amonio y nitrato de amonio. La combustión de diesel es el mayor contribuyente a estas partículas llegando inclusive a emitir el 90% del total de estas partículas, ello tiene sustento en el hecho que los vehículos de combustión a diesel sin convertidor catalítico generan de 100 a 150 veces más emisiones de estas características. El tamaño de las partículas es también importante cuando se tienen en consideración el grado de toxicidad que repercute en el cuerpo humano, un incremento de 10% en PM_{10} pueden significar millones de partículas con toxinas en contacto con el organismo, debido a que la superficie total es

mayor, esto conduce a demostrar también que estas partículas pequeñas contendrán más radicales libres que las más gruesas lo cual puede ser el causante de las inflamaciones en pulmones y otros casos médicos.

Los estudios dirigidos a animales expuestos a grandes cantidades de partículas menores de 10 μm resultaron en una actividad intensa fagocitaria seguida de una depresión de las membranas alveolares lo cual condujo a un daño de las células epiteliales ciliadas en contacto con la tráquea y las vías respiratorias. Los roedores expuestos a estas partículas en forma crónica presentaron niveles altos de enzimas citoplásmicas, lisosomales y proteínas totales lo que indica deterioro celular, seguido de un aumento en la síntesis y deposición de colágeno produciendo engrosamiento de la septa alveolar y las células de la sangre terminando en una fibrosis intersticial. Los cerdos de guinea y ratones expuestos a partículas de este tipo, pero a partir de la combustión de diesel, demostraron un incremento en la mucosidad nasal y respuestas exageradas a la histamina, con aumento de estornudos y secreciones nasales, esto está asociado a permeabilidad vascular, rigidez parénquima pulmonar, resistencia de las vías respiratorias y reducción de los volúmenes pulmonares. Ratones con similitudes asmáticas incrementaron sus linfocitos en el tejido pulmonar así como acrecentamiento del número de células caliciformes en el epitelio bronquial. Asimismo se genera una insuficiencia en la respuesta inmunológica por problemas relacionados al RNA. Las partículas de diesel son también vectores de alérgenos naturales sobre su superficie, esto tendría un efecto acumulado en cuanto a la dosis de estos alérgenos que ingresan al pulmón y al mismo tiempo promoviendo su antialérgenismo.

Los estudios realizados in vitro sobre colonias de células muestran que las células epiteliales y las macrófagos son los blancos directos de las toxinas. Las células epiteliales de las vías primarias de respiración son las que se encargan de fagocitar las partículas cuando entran en contacto, no obstante esto genera una inflamación de todo el conducto. Esto indica que las células epiteliales pueden tener funciones fagocitarias como las macrófagos y neutrófilas, por otro lado actúan también como respuestas inflamatorias

secretando mediadores. Esta respuesta por parte de las células epiteliales son mayores cuando se tratan de cuadros asmáticos. Además los estudios han demostrado que las partículas metálicas producen un estrés oxidante, lo que es probable que desencadene la acción de mediadores inflamatorios. Las fuentes de emisión y las partículas del ambiente provenientes de combustión de combustibles (diesel) contienen concentraciones significantes de metales de la primera columna de la tabla periódica lo que mejora su capacidad de realizar intercambios iónicos. Estos cambios moleculares generan rinitis alérgica y asma bronquial observada durante episodios agudos de contaminación. Así también las partículas debidas a la combustión de diesel que contienen hierro y cobre sugieren cambios en la respuesta orgánica como inflamaciones y depresiones de las actividades de limpieza de las vías.

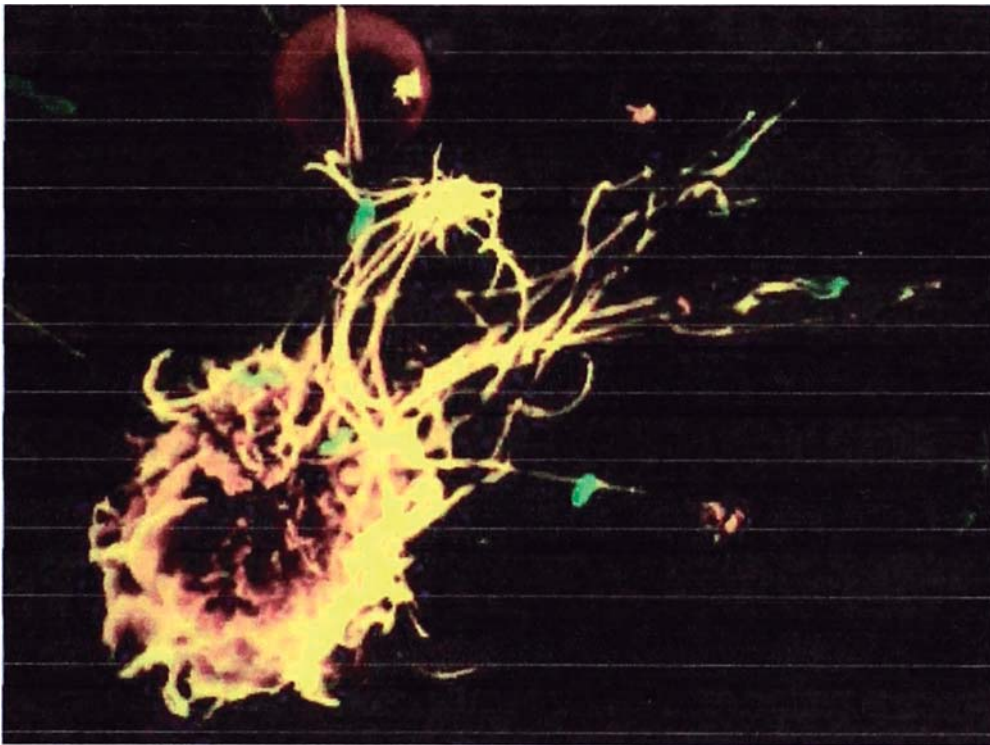


Figura 4.34. Macrófago (amarillo) atrapando partículas extrañas como polvo, amianto y bacterias. Recuperado el 12 de marzo de 2008, de www.vi.cl/foro/index.php?showtopic=5698&st=20

Los estudios in vivo de humanos realizados en la década de 1990 usando voluntarios para ser expuestos a partículas emitidas por la combustión de

diesel por el espacio de 1 h demostraron que un incremento en el número de macrófagos alveolares, neutrófilos y linfocitos T en el fluido alveolar. De igual forma, las partículas han mostrado cuadros agudos en el tejido de las vías respiratorias y en la sangre de los individuos monitoreados. Estos indicios inflamatorios incluyen neutrofilia periférica en la sangre y trombosis, incremento de la histamina, fibronectina, neutrófilos y linfocitos B en las vías respiratorias y un incremento del número de células inflamatorias (neutrófilos, linfocitos y mastocitos) en el tejido bronquial. Similarmente, las partículas a partir de diesel mostraron un incremento en la trascrición de la expresión de la proteína IL-8 en el epitelio bronquial humano.

Una interacción de partículas diesel aumentó la respuesta nasal en forma de *alergia y rinitis en los sujetos en prueba*, esto indica que estas partículas inducen a una elevada respuesta mucosa.

A parte de las propiedades físicas de las partículas ultrafinas, la toxicidad también ha sido relacionada con el pH y contenido de metales. Una porción considerable de metales son absorbidos en la superficie de las partículas, las cuales son capaces de generar especies mediáticas de oxígeno reactivo en las células de las vías respiratorias. Esta situación desencadena la formación de moléculas como citoquinas lo cual se traduce en cuadros de inflamación.

Los estudios realizados de las partículas en cuestión considerando los efectos en el sistema cardiovascular sugieren que las inflamaciones menores de los alvéolos pueden incrementar el grado de coagulación y que la alteración del flujo sanguíneo pueden entonces realizar un mecanismo relacionando la contaminación con la morbilidad y mortalidad debido a problemas cardiovasculares. Variados factores hematológicos, como la viscosidad del plasma, fibrinógenos, factor VII y activadores inhibidores de plasminógenos son indicadores de enfermedades cardiovasculares. En un estudio realizado por Peters et al. ha demostrado recientemente que la viscosidad hallada en el plasma está relacionada con niveles altos de partículas en la atmósfera donde estos individuos realizaban sus actividades. Asimismo la inserción de partículas ultrafinas de carbón negro en pulmones de ratones ha demostrado un incremento en los niveles de coagulación del factor VII. La exposición de 1

En humanos saludables ha demostrado el incremento de plaquetas y neutrófilos en la sangre periférica, así como una respuesta inflamatoria aguda en las células de las vías respiratorias. Un incremento de estos agentes puede variar el flujo sanguíneo normal debido a la resistencia diferencial produciendo una insuficiencia en ciertos órganos. Respuestas similares pueden darse cuando existe una inflamación asociada a las partículas en forma periódica lo que podría desarrollar en una activación crónica de circulación de neutrófilos en niveles altos lo que puede conllevar a perjuicio cardiovascular. Estos efectos pueden ser mayores en pacientes que ya presentan disfunciones miocárdicas.

El cuerpo es receptor de estas partículas por medio de las vías respiratorias y su capacidad perjudicial depende de la mayor trayectoria en el interior de las mencionadas. Por ello cabe recalcar que son las más finas la que cuentan con un mejor mecanismo de penetración en bronquiolos e incluso alvéolos.

Las PM_{10} pueden tener efectos en la salud según EPA de la siguiente forma:

- Las exposiciones a corto plazo pueden irritar los pulmones y probablemente causar respuestas inmunológicas; constricción de los pulmones, produciendo falta de aliento y tos.
- Los materiales que se disuelven a partir de las mencionadas pueden dañar las células del organismo.
- Las exposiciones a largo plazo con niveles bajos de concentración pueden causar cáncer y muerte prematura. (Una serie de estudios han determinado mortalidad diaria en algunas ciudades de Estados Unidos con concentraciones de PM_{10}).

Aquellas personas con historia de asma o enfermedades crónicas a los pulmones son especialmente sensibles a estos efectos. Los ancianos o aquellos con condiciones pre-existentes del corazón también pueden tener

severas reacciones ya que la falta de oxígeno colocaría al órgano en mención en una situación tensa.

Las partículas que causan irritación mecánica incluyen: hollín, ceniza, fly, polen, yeast, hongos y sal. También pueden ser compuestos que formen ácidos cuando se mezclan con la humedad de los pulmones. El sulfato amónico de zinc es reportado a menudo como un constituyente del smog, y las partículas de este compuesto forma ácido sulfúrico en los pulmones. Los animales que fueron expuestos a las partículas de estos compuestos de diámetro un micrómetro aproximadamente fueron más susceptibles a desarrollar infecciones respiratorias que los animales expuestos a otras partículas de tamaño similar. Las partículas de este compuesto también causan la constricción de los bronquios con mayor facilidad que otras, especialmente en aquellos pacientes con asma o los que sufren de enfermedades crónicas pulmonares.



Figura 4.35. Partículas generadas por combustión de vehículos motorizados.

Recuperado el 12 de marzo de 2008, de

<http://usuarios.lycos.es/contaminacionguate/resume.html>

Las partículas contenidas en la mezcla de combustión procedentes de vehículos diesel (*hollín, fly, ceniza*) contienen una serie de compuestos como benzo(a)pireno (catalogado por la EPA como posible carcinógeno humano). Las emisiones particuladas de diesel son potenciales inductores de tumores. La *inhalación crónica* ha demostrado desarrollar cáncer en animales en

estudios desarrollados en laboratorio (Wisconsin Department of Natural Resources, 2005).

Algunos factores pueden afectar el viaje de las partículas en el interior del organismo: el respirar a través de la boca, cuando se realiza actividad física demandante, la edad avanzada debido a las inspiraciones poco profundas, las enfermedades pulmonares cuya mecánica de acción no permite el ingreso de las partículas, el estado del tiempo, otros contaminantes del aire, etc.

Los pulmones producen mucosidad para atrapar a las partículas acto seguido la vellosidad presente en las vías respiratorias responde con ciertos movimientos que van desplazándolas hacia el exterior. Cuando la concentración de estas partículas es alta y su tamaño ínfimo estas se alojan en los bronquiolos y alvéolos siendo imposible expectorarlas resultando en enfermedades pulmonares como enfisema o cáncer. Además el problema se agudiza cuando estas partículas cuentan en su composición metales pesados y sustancias orgánicas. Los efectos en la salud pueden observarse cuando ocurre: tos, resollo o dificultad al respirar, agudización de problemas relacionados con el asma, condiciones agravantes en enfermedades cardio pulmonares, etc. (EMPACT, 2004).

4.1.8.2. Factores Meteorológicos Condicionantes

Los contaminantes se ven afectados por las condiciones atmosféricas y en relación al tiempo, algunos autores han resumido las variantes de la siguiente forma: el desplazamiento de contaminantes y la dispersión de los mismos.

“Se conoce como altura efectiva al espacio vertical en línea recta que alcanzan los contaminantes por encima de la fuente de emisión; siendo en el caso de chimeneas nitidamente apreciables.” La elevación de las emisiones dependerá de las condiciones de formación y salida de los efluentes. Los dos factores que regirán importancia son la velocidad del viento y la altura. El primero, si es notable reduce la elevación de evacuación; el segundo está relacionado con la disminución de la temperatura (a mayor altitud menor temperatura), esto condicionado a la velocidad de abatimiento y capas de inversión, entre otros. En resumen la altura efectiva depende considerablemente de la diferencia de temperaturas entre el efluente y el aire

circundante, además entre los factores internos al efluente destacan el área de emisión y la velocidad de salida.

Con respecto al desplazamiento, los contaminantes son transportados por el viento horizontalmente, no obstante la dirección no es la misma en todo su volumen sino que sufre variaciones debido a la turbulencia. La turbulencia no tiene un orden definido que tienden a ser ascendente mezclando el aire contaminado con el presente. La magnitud de la turbulencia es directamente proporcional a la dispersión. Esta turbulencia se puede mostrar en forma de remolinos cuyos mecanismos de formación son causados por el calentamiento ascendente y fuerzas constantes, el último es notorio cuando la temperatura tiende a disminuir con la altura (Vizcarra, 1982).

Los factores relevantes en la contaminación atmosférica en torno a las partículas de PM_{10} se pueden dividir como:

- a. **Factores Meteorológicos a Microescala.** Estos son asociados con la dirección y velocidad del viento y la turbulencia, la última mencionada a través de la estratificación, número de Richardson y longitud de Monin-Obukhov o categoría de estabilidad. Estos factores atmosféricos determinan el grado de influencia que el transporte atmosférico y las características del proceso de mezcla tienen sobre la dispersión de los contaminantes.

Otros factores meteorológicos son la radiación solar y el perfil de temperatura, influyendo la primera sobre el segundo. Su efecto viene reflejado en la categoría de estabilidad que afectará el perfil de velocidades y a la dispersión. Además la nubosidad afecta alterando la cantidad de radiación solar que llega al suelo, por consiguiente, a la estratificación. Si las nubes son estratiformes, además de impedir el calentamiento del suelo o el enfriamiento de la tierra, es síntoma de la existencia de una inversión térmica a la altura del estrato. En forma contraria cuando se forman cúmulos o nubes de desarrollo vertical implica que existan movimientos de convección y turbulencia térmica.

La existencia de niebla de radiación, producida por enfriamiento de las capas inferiores del aire, corresponde a una situación de contaminación en ciudades y zonas industriales; la característica higroscópica de los contaminantes permite que se formen gotas diminutas de niebla, arrastrando otros contaminantes presentes en la atmósfera. El efecto beneficioso de la lluvia suele perdurar varios días, por eliminación del polvo y mejor capacidad de captación vegetal.

- b. Factores Meteorológicos a Media y Gran Escala.** Están ligados a situaciones meteorológicas con extensiones de terreno de 100 y 1000 Km.

Las masas en movimiento de aire suelen clasificarse en polar y tropical. Las *frías avanzan normalmente hacia latitudes bajas* y suelos más calientes, cuando esto sucede la convección térmica se activa e inicia la mezcla turbulenta por inestabilización. Por el contrario, las masas de aire *cálido, al avanzar sobre suelo frío, se enfría por la zona más cercana de contacto estabilizándose gradualmente.* Por consiguiente, a igualdad de otros factores, los niveles de contaminación son siempre más altos en el seno de las masas cálidas que en las frías.

Las inversiones de subsidencia se presentan en la zona central de una *anticiclón, limitando durante varios días la tensión de la capa de mezcla* aunque desaparezca la inversión junto al suelo. Ello provoca un aumento considerable en la concentración de contaminantes difíciles de ser eliminados por falta de ventilación vertical. En sentido opuesto, en caso de ciclón, toda la cadena de procesos resulta favorable a la dispersión.

Otro aspecto importante es la influencia de vientos tales como brisas y monzones. Ambos debidos al desigual calentamiento de tierras y mares. Las brisas (ver fig. 4.36) tienen una variación diurna pues de día la tierra tiende a calentarse más que el mar por la acción de la brisa marina, no así por la noche, ya que se enfría más la tierra, apareciendo la brisa

terrestre. Los monzones tienen una tendencia estacional, en verano sopla del mar hacia el interior mientras que en invierno del continente al mar. Cuando ocurre el primer caso se origina, como en los anticiclones, un descenso de la masa de aire sobre el continente, reforzándose la estabilidad y aportando hacia el suelo los contaminantes. El efecto contrario ocurre en el segundo caso.

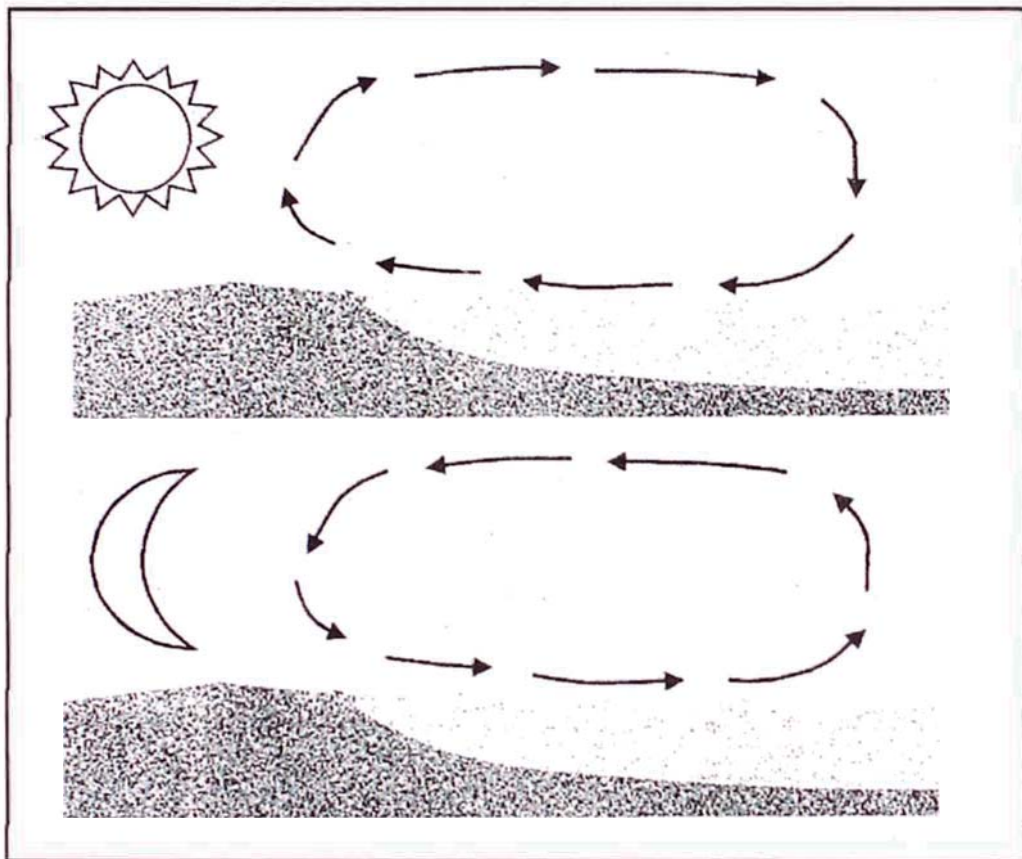


Figura 4.36. Las brisas diurna y nocturna (Espert y López, 2004)

- c. **Efectos Topográficos Sobre el Flujo de Aire.** La topografía local puede incidir sobre la dispersión de contaminantes a partir de una fuente de emisión fija. Cuando se trata de un terreno con rugosidad constante, los perfiles de viento y temperatura deducidos en una estación meteorológica son válidos para toda la zona; no obstante cuando existen obstáculos (edificios, árboles aislados, barreras vegetales, etc.) aparecen perturbaciones en el flujo de viento caracterizadas a sotavento de los

mismos por alteraciones importantes de la turbulencia, velocidad y dirección del viento.

El flujo perturbado alrededor de un edificio es complejo. Los experimentos han demostrado que las zonas contiguas de perturbación se extienden a sotavento entre 2.5 y 4 veces su altura, a los lados de la estructura entre 0.5 y 1 vez la altura y en la parte de barlovento hasta 0.5 veces (ver fig.4.37); mas allá de la zona de inmediata de perturbación, el defecto de velocidad media y la intensidad de turbulencia tienden a decrecer con el aumento de distancia a sotavento.

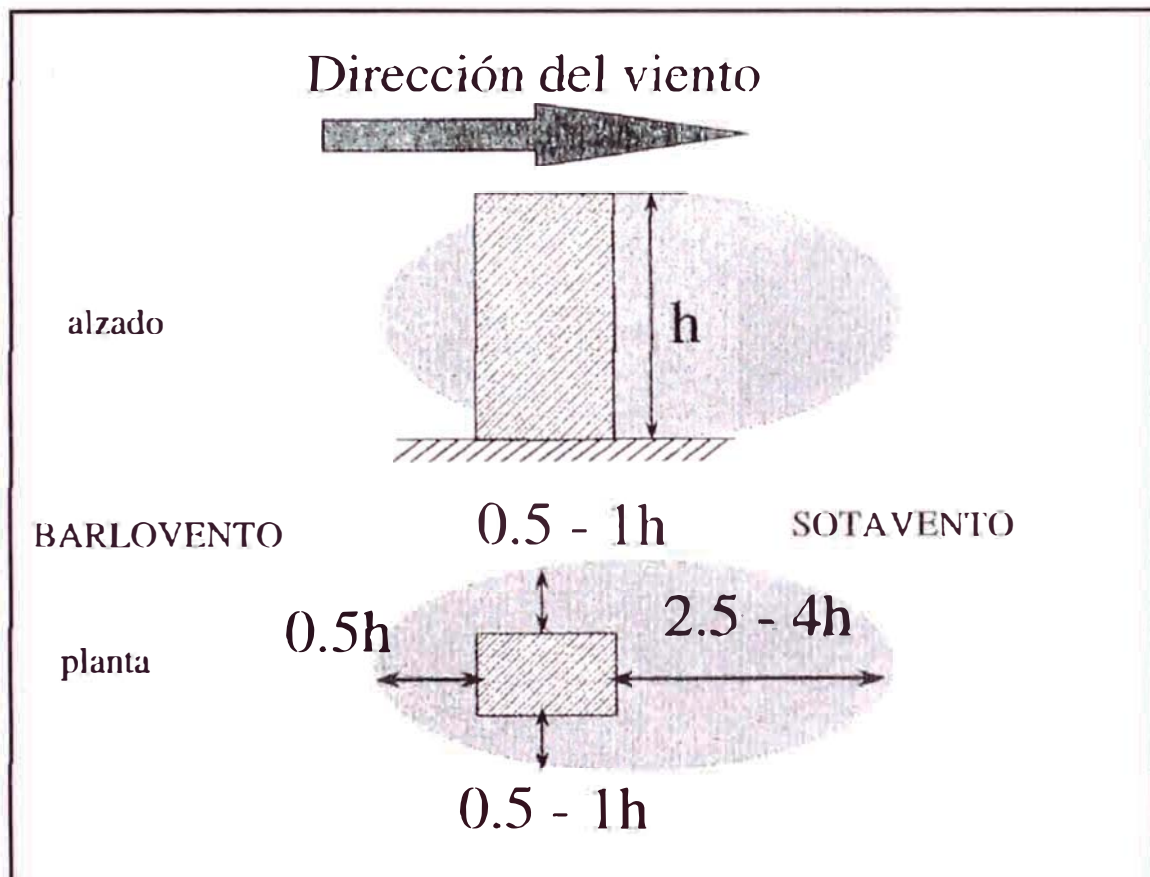


Figura 4.37. Estela generada por los obstáculos (Espert y López, 2004)

Si la emisión del penacho de contaminantes se realiza dentro de la zona del flujo, se va a producir una proyección de los contaminantes hacia el suelo. En vista de evitar este suceso, la chimenea debe ser instalada a

una distancia mínima del obstáculo de una 10 veces la altura de éste. O bien, si no es posible, 2.5 veces la del obstáculo (ver fig. 4.38).

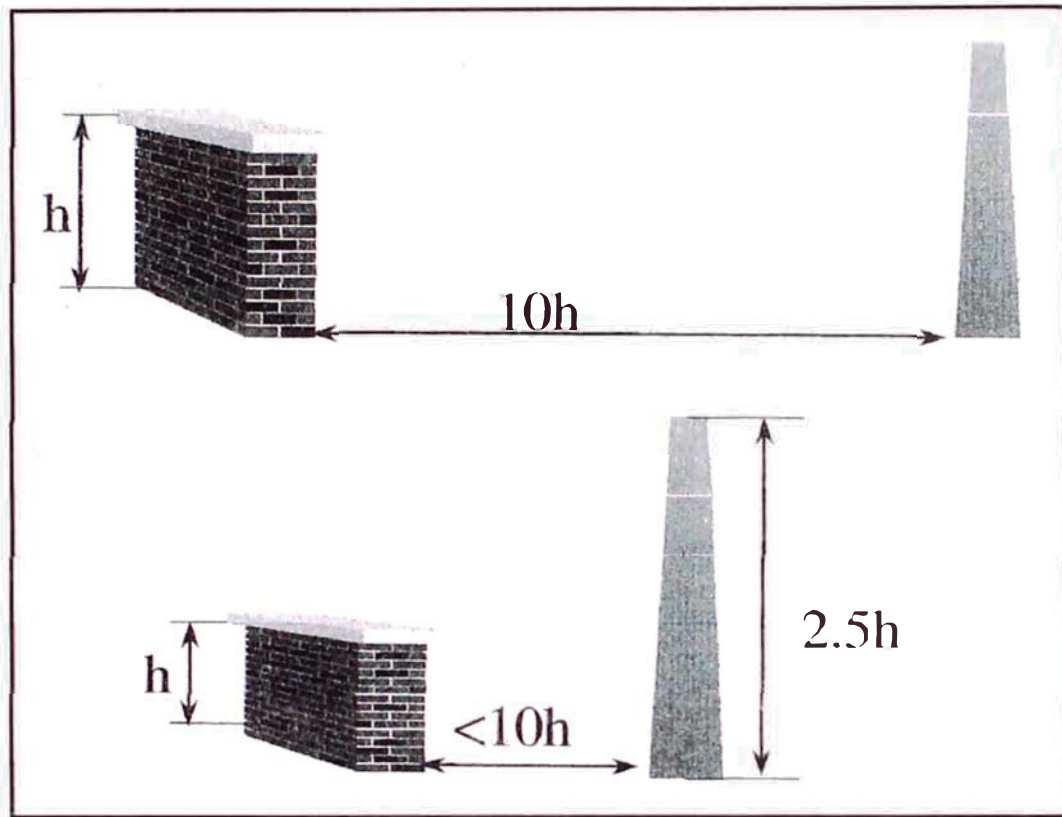


Figura 4.38. Distancia mínima para evitar la influencia de la cercanía de los obstáculos a la chimenea (Espert y López, 2004)

Si los obstáculos están constituidos por colinas, acantilados, o cadenas de montañas pueden aparecer despegues con flujo inverso y estelas turbulentas en las proximidades de los mismos, dependiendo de la dirección del viento. Dependiendo el emplazamiento del punto de emisión, los obstáculos pueden agudizar la contaminación al ras del suelo (ver fig. 4.39).

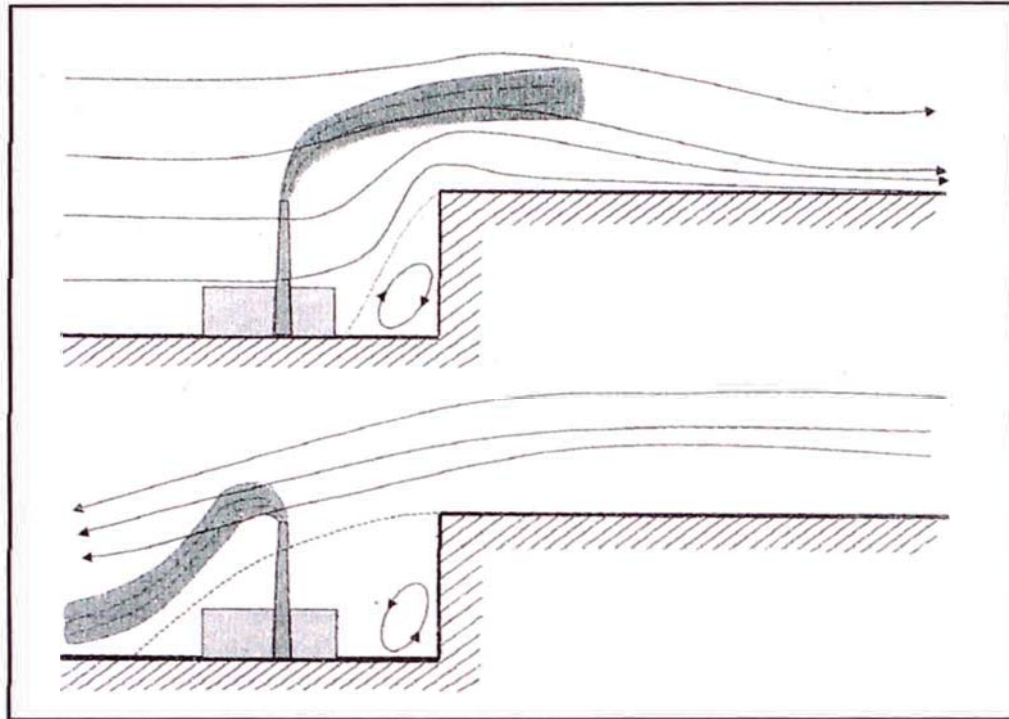


Figura 4.39. Efecto del relieve del terreno sobre el penacho de contaminantes (Espert y López, 2004).

Las variaciones en la estructura del viento en una zona montañosa o con *impedimentos de flujo por edificaciones no pueden ser estudiadas por modelos matemáticos simples por lo que se tienen que realizar pruebas de laboratorio para cada caso.*

Los efectos térmicos en relación con la topografía se presentará en la relación que tienen las brisas marinas y terrestres don los vientos de valle y montaña, asociados con las diferentes variaciones de calor entre mar y tierra, o entre las distintas formaciones de valles y montañas. La generación de brisas implica formaciones de capas de inversión lo que permite que la conducción del aire sea dirigido al ras del suelo y por ende influir negativamente en la contaminación. Este fenómeno se explica a partir del movimiento circular del aire que constituye el efecto de brisa (ver fig. 4.40). Los emitidos en zona de costa en las horas de la mañana y atrapados por la brisa diurna pueden volver a la misma zona en horas de la tarde y reforzar la contaminación de la misma.

En las zonas urbanas las variaciones térmicas pueden ser influidas por las variaciones microclimáticas relacionadas con las calefacciones, tráfico, etc., así como la acumulación térmica condicionada al pavimento y construcciones. Esto provoca que la temperatura en el interior de la zona urbana sea superior a la que predomina en la zona rural contigua, actuando la primera como un emisor de contaminación. Esta sobreelevación favorece a la dispersión de contaminantes urbanos en la zona rural en contacto (Espert y López, 2004).

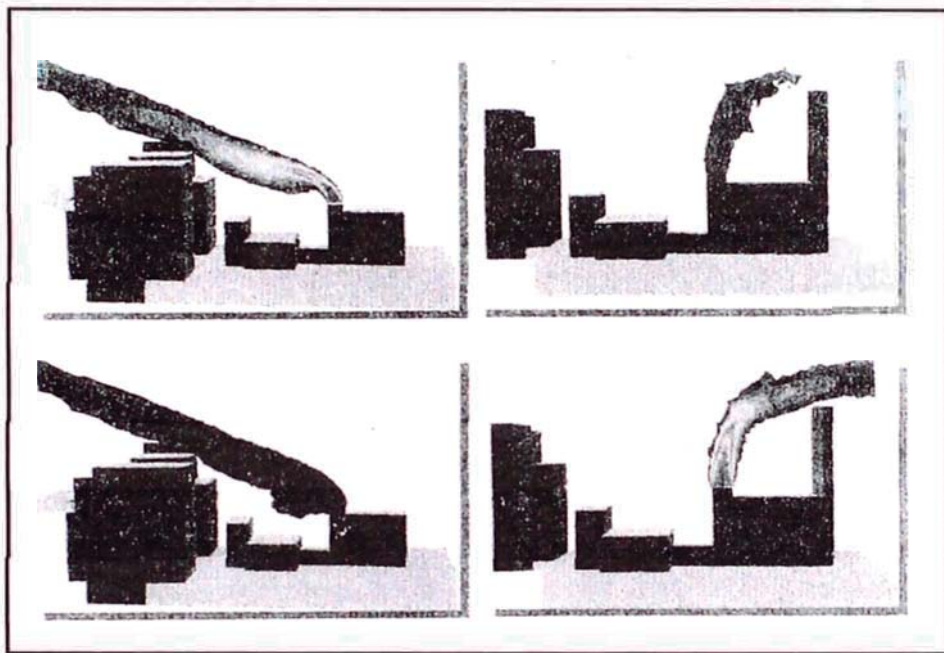


Figura 4.40. Formas de penachos en modelamiento físico (Espert y López, 2004).

- d. **Sinergia de Factores.** Las reacciones químicas dependen también de las condiciones meteorológicas del ambiente ya que guardan relación con las radiaciones, temperatura del aire, y humedad relativa. Con las reacciones químicas, la dispersión y el proceso de dilución; las concentraciones de contaminantes variarán con respecto al tiempo y espacio.

Respecto a la dependencia del clima y la ubicación en la colección de contaminantes las diferencias de temperaturas entre el día y la noche promueve la formación de rocío, así como la humedad relativa tiende a

ser alta, especialmente durante épocas de invierno. Las zonas donde la prevalencia del viento tiende a ser 3 ms^{-1} suelen tener tormentas de arena en el orden de 10 ms^{-1} . En estas áreas la humedad relativa fluctúa entre 55% y 70% en verano e invierno respectivamente (Eldimir, 2005). Otro aspecto a resaltar es que durante los meses de invierno las concentraciones de los contaminantes se elevan por causa de la capa de inversión disminuida, así también las temperaturas más frías contribuyen a un significativo aumento de la formación de partículas a través del núcleo (Kuhn et al., 2005). Las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ en tiempos de calor han sido reportadas como en 30% mayores que las pertenecientes a épocas de frío (Hu et al., 2002).

Las emisiones de gases y partículas a partir de vehículos transitando por vías urbanas, industria y polvo suspendido; sumados a condiciones desfavorables de dispersión, son responsables por las concentraciones elevadas de contaminantes. Las últimas mencionadas pueden ser observadas por la población como una especie de nubosidad marrón generalmente durante los meses de invierno debido a la baja temperatura, decremento de la profundidad de mezcla, inversión, densidad del tráfico, hábitos de manejo vehicular y la tasa de camiones versus automóviles.

Los vientos predominantes, que transportan humedad y partículas de aerosol de fuentes distantes, influyen en las variaciones de turbidez. Las correlaciones entre la concentración de contaminantes y velocidad del viento es negativa. Este comportamiento es convincente cuando los elementos que no pertenecen a la corteza terrestre son transportados y explican la claridad del aire local (Eldimir, 2005).

Existen estudios que indican que las tormentas de arena son también responsables de elevar la concentración de PM_{10} de 5 a 10 veces cuando ocurren (Triantafyllou, 2001; Xie, et. al., 2004). Xie señala que estas partículas son de morfología irregular y contienen elementos en su mayoría de la corteza como Si, Fe, Ca y Al; en el estudio que condujo en

China sostiene que debido al análisis cualitativo realizado en las muestras, se observó que la contaminación vinculada a las tormentas de arena son debidas a fuentes naturales.

Otro criterio para relacionar los vientos de velocidad alta y la contaminación por PM_{10} fue desarrollado por Xie, cuando observó el comportamiento de otros contaminantes. En el trabajo realizado en Beijing, Xie demostró que los contaminantes SO_2 , NO_2 y NO_x disminuían en la concentración promedio durante los episodios de tormentas de arena, no así con respecto al PM_{10} . Es necesario enfatizar que la contaminación por causa de neblinas genera una alta concentración de los tres primeros mencionados, debido a una considerable temperatura de inversión y a una humedad relativa elevada entre 80 y 100%.

Con respecto a los contaminantes troposféricos y su relación con la humedad se puede señalar que no solamente analizando la dirección y velocidad superficial del viento se puede explicar la variabilidad en las concentraciones de los contaminantes. Por ello, el análisis de parámetros meteorológicos que afecten la concentración de contaminantes ambientales deben contener un indicador de humedad atmosférica (vapor de agua/contenido de humedad). Las concentraciones altas de ciertos contaminantes como el NO_2 y O_3 suelen ocurrir cuando la humedad es menor o igual a 40%. Esto puede ser atribuido al aumento de la oxidación de hidrocarburos en las horas de la tarde, lo que mejora la producción de ozono. En el caso del PM_{10} las más altas concentraciones tenderán a acentuarse cuando la humedad es de 80% y más. El incremento de humedad resulta en una corriente de masas de aire ascendente hasta los 3 Km de altitud. Por otro lado la humedad alta puede también indicar episodios de lluvia que resultan en un barrido de nubes, lo que indicaría una baja concentración de gases y aerosoles. Este fenómeno debería afectar más al NO_2 y O_3 que al SO_2 y PM_{10} . Por esta razón las concentraciones promedio más altas para los primeros ocurren cuando la humedad es menor de 40% (Karar, et al., 2006; Heldimir, 2005). La humedad puede tener un papel contrario al

explicado, en su mayoría en ciudades ya que cuando esta es alta, en algunas zonas en invierno, genera altas concentraciones de contaminantes particulados por la precaria velocidad de vientos y baja altura de mezcla, lo que ocasiona acumulación de estos agentes (Karar, et al., 2006). Por otro lado, las lluvias pueden realizar una especie de lavado de los contaminantes suspendidos (Karar, et al., 2006).

Para determinar la dependencia de los contaminantes ambientales con respecto a la temperatura se puede afirmar que la asociación entre los contaminantes primarios y la temperatura no constituye un factor significativo. Con respecto al PM₁₀, los máximos pueden ser observados en el invierno e inicios de primavera, es decir entre los 10 y 20 °C (Heldimir, 2005).

Las condiciones meteorológicas están relacionadas con el tipo de constituyentes en el PM₁₀. Se explicó detalladamente en un estudio realizado en Beijing por Xie, que el tipo de fenómeno relacionado con las fuentes de contaminación influye en la composición de PM₁₀. El estudio fue realizado con variantes meteorológicas que sirvieron de parámetro para entablar una relación directa entre fuentes de contaminación y componentes en las muestras de material particulado. Se realizaron los monitoreos en días de lluvia, neblina y tormentas de arena. Los restos recolectados en el primer grupo fueron orgánicos, seguidos por material de la corteza¹ sulfato, nitrato, amonio y cloruro. Los orgánicos fueron los más representativos siendo estos el 30% del total recolectado, seguidos por el material de la corteza que alcanzó casi el 25%. En el segundo grupo la contaminación fue más notoria por parte de los sulfatos, los siguientes son los nitratos y casi en el mismo porcentaje los orgánicos. Durante periodos de tormenta de arena los resultados en los estudios revelaron que la contaminación es primordialmente de material de corteza en un casi 70% lo que indica que las fuentes son en su mayoría

¹ material de corteza en muestras de aerosol ha sido estimado usando Al, Si, Ca, Ti, K y Fe como óxidos, los cuales en ser expresados como: material de corteza=1.15(1.89Al+2.14Si+1.67Ti+1.4Ca+1.2K+1.36Fe)

naturales, producto de la erosión de la tierra por causa de los vientos (Xie et al., 2004).

Otros estudios han indicado que la velocidad de viento, la altura de mezcla y la humedad relativa son las variables meteorológicas con mayor influencia en las concentraciones de PM_{10} . Se sostiene también que las inversiones atmosféricas tienden a correlacionarse con las concentraciones de las partículas ya mencionadas debido a la acumulación cerca de la superficie del suelo. Los vientos con velocidades altas pueden mejorar la ventilación, no obstante este fenómeno se relaciona más con elevadas concentraciones de PM_{10} ya que permiten que las partículas se suspendan y se transporten por áreas considerables. Así también, las concentraciones altas de PM_{10} son asociadas con el grado de sequedad del ambiente ya que esto incrementa el potencial de suspensión del polvo, tierra y otras partículas (Wise and Comrie, 2005).

Si se toma en consideración las estaciones del año, es necesario reconocer el tipo de elementos climatológicos que estas acarrearán dentro de la zona de estudio. Por ejemplo, si se habla de verano con altas lluvias lo apropiado es esperar que las concentraciones del material particulado se vea disminuido por la acción de arrastre de las lluvias, así también hay que señalar que en algunas partes del mundo el verano incluye una mayor profundidad de mezcla lo que supone una dilución. Las masas de aire del océano pueden también contribuir a la dispersión de contaminantes aunque tienden a adherir otras componentes que influyen en la concentración de PM_{10} . Para estos casos específicos los mayores componentes de PM en zonas urbanas es materia orgánica, mientras que en las zonas costeras se encuentra sal de mar y sulfatos (Ho et al., 2005).

4.1.8.3. Tráfico y Topografía Local. El viento puede ayudar a elevar las concentraciones de PM_{10} en zonas de alto tráfico y ser agente de disolución en zonas donde no existen más fuentes de este contaminante. Además la

disposición de construcciones, dependiendo de la altura que estas posean, determinará la capacidad de mezcla y dispersión de los contaminantes.

La dirección y velocidad del viento únicamente no guardan en repetidas ocasiones una relación directa con las concentraciones elevadas, sino que se debe incluir la topografía y la disposición exacta de los puntos de monitoreo para retener un estudio que explique mejor los fenómenos.

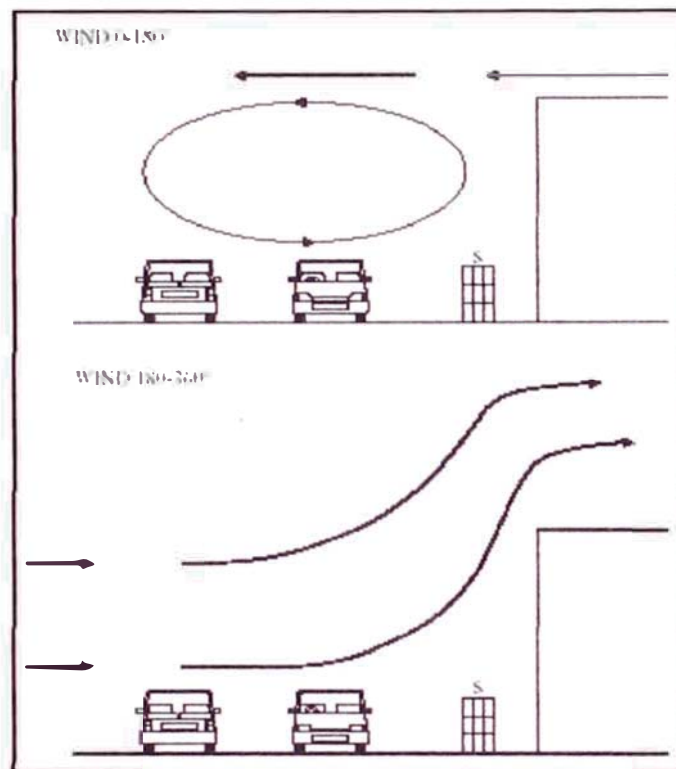


Figura 4.41. La dirección del viento genera vórtices dependiendo de la topografía del terreno local. S es el punto de monitoreo.

4.1.8.4. Monitoreo de PM_{10} . Las formas de monitoreo para este tipo de contaminantes se dictamina por el principio gravimétrico, es decir, se capta una muestra de aire en unidades volumétricas, que fluyen a través de un cuerpo filtrante que separa los contaminantes del resto de masa gaseosa. Luego, se pesa la materia conteniendo los contaminantes separados para pesarla. De ese modo se halla la concentración.

Los equipos normalmente usados en el monitoreo de los contaminantes particulados son las series TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance), Partisol 2000 y el MINIVOL.

El TEOM es manufacturado por Rupprecht y Patashnick y está respaldado como método equivalente por la US EPA proveyendo masas de PM_{10} en 15 min a partir de un flujo de $3 \text{ dm}^3\text{min}^{-1}$. El Partisol Model 2000 Air Sampler también fabricado por el anterior mencionado aprobado también por el US EPA como método equivalente tiene un flujo $16.7 \text{ dm}^3\text{min}^{-1}$ a través de un filtro de 47 mm. El MINIVOL Portable Survey Sampler es manufacturado por Airmetrics (US) y capta el aire a razón de $5 \text{ dm}^3\text{min}^{-1}$ a través de un impactor que realiza la función de separar las partículas a través de un filtro de 47 mm (Salter y Parsons, 1998).

El equipo de monitoreo MINIVOL fue desarrollado por Lane Regional Air Pollution Authority (Autoridad Regional para la Contaminación del Aire en Lane) y el US Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos) para caracterizar la distribución espacial y temporal del material particulado (como PM_{10} y $PM_{2.5}$). El diseño portátil del muestreador y su uso simple lo ha hecho popular para evaluaciones de la calidad de aire. Las ventajas del MINIVOL incluye la habilidad de incrementar los puntos de muestreo para mejorar la distribución espacial de la data colectada y la capacidad de medir concentraciones de contaminantes en casi cualquier locación. Sin embargo existe todavía poca información en la confianza, precisión y comparación del muestreador con otras técnicas de recolección. Este equipo construido por Airmetrics, es un muestreador portátil para PM_{10} y $PM_{2.5}$ a 5 l/m de flujo y batería para 24 horas con una sola carga. Las unidades están equipadas con cronómetros para inicios y apagados automáticos. Los dispositivos de impacto seleccionan los PM_{10} y $PM_{2.5}$.

Para evaluar la confianza, precisión y comparación del equipo se establecieron puntos en el sudeste de Kansas, Estados Unidos. Todos los puntos de captación se colocaron a 2 m. del suelo. La separación entre uno y otro punto

de captación fue de 0.5 m y es espaciado para comparaciones con los muestreadores fijos fue aproximadamente de 1 m.

Los equipos de PM_{10} y $PM_{2.5}$ fueron establecidos en sitios separados para evaluar la precisión del muestreador. Ambos muestreadores fueron programados para operar durante el mismo periodo de tiempo y coleccionar muestras en el mismo medio filtrante. Numerosos muestreadores fueron rotados a lo largo del estudio para impedir sesgos.

Los muestreadores MINIVOL fueron colocados con un promedio de tiempo dicotómico $PM_{10}/PM_{2.5}$ comparado con el Versatile Air Pollutant Sampler (Muestreador Versátil de Aire Contaminado) y con TEOM para PM_{10} . Todos los muestreadores fueron evaluados en el mismo lapso. Las muestras de los muestreadores MINIVOL fueron captadas en un medio de fibra de medio recubierto de teflón de 47 mm (Pall Corporation #T60A20, Ann Arbor, MI, USA). Y medido usando un Cahn Model C-33 Microbalance (Orion Research Inc., Boston, MA, USA). Las cargas de masa de los VAPS fueron coleccionadas en filtros con membrana de teflón de 47 mm (1 μ m de luz #R2PL047, Pall Corporation, Ann Arbor, MI, USA) y también medidos con la microbalanza Cahn. Todos los filtros analizados fueron equilibrados antes y después del pesado por un periodo de 24 horas en una cámara controlada a 20°C y 40% de humedad relativa. Las concentraciones de las masas reportadas no fueron corregidas con temperatura y presión estándar. Los otros MINIVOL fueron también rotados a lo largo de los lugares de monitoreo.

El laboratorio, transporte y los blancos fueron evaluados para cada día de muestreo para identificar posibles contaminaciones durante el análisis de filtración y las etapas de manejo o durante la exposición estática de la materia particulada atmosférica entre los días de muestreo. Los blancos de laboratorio fueron almacenados en cámaras controladas de temperatura y humedad entre análisis. Los blancos de transporte fueron instalados en los dispositivos de captación de los MINIVOL, acomodados en el equipo y puestos en el campo entre análisis. Los blancos del campo fueron instalados en el equipo y

expuestos al aire ambiental estático durante 5 días. Los blancos de campo fueron obtenidos cuando un MINIVOL no funcionó en forma apropiada.

Los procedimientos de operación y mantenimiento utilizados durante el estudio fueron tomados de las guías recomendadas por los fabricantes. Las diferencias entre temperatura y presión del flujo en las condiciones de muestreo fueron tomadas de un estudio piloto de 3 meses.

Las pruebas fueron conducidas en instalaciones de la EPA (Federal Reference Method Wind Túnel in Research Triangle Park, North Carolina) para determinar la eficiencia de colección del MINIVOL. La entrada del equipo fue probada con partículas de 10 μm de diámetro aerodinámico y con vientos de velocidad aproximada de 2, 8, 14, 20 y 24 Km/h. El test de aerosol consistió en rociar la cámara con partículas de ácido oleico con trazas de urina a través de un orificio generador de aerosoles (VOAG). Tres muestreadores isocinéticos se colocaron alrededor de la entrada del equipo para determinar la concentración en el túnel de viento y asegurar la apropiada mezcla de aerosol. El filtro en entrada del MINIVOL y cada uno de los filtros isocinéticos fueron lavados con 20 ml al 0,001 N de hidróxido de sodio acuoso para determinar la cantidad de aerosol colectada.

Los resultados fueron analizados teniendo en cuenta:

- a. **Confianza en el Rendimiento.** La campaña consistió en 1574 eventos potenciales de muestreo. Ocurrieron 68 fallas mecánicas en el MINIVOL. De ellas, 19 ocurrieron durante los primeros 3 días de prueba cuando las temperaturas de inicio fueron inferiores a 0 °C. Las fallas fueron registradas posiblemente por el congelamiento de las bombas. En adición 39 muestras fueron descartadas por ingreso de insectos y 9 fueron suspendidas por errores de operación. El éxito de la colección para un año de estudio probatorio del MINIVOL fue de 93%. El MINIVOL operó sin inconvenientes el 96% para pruebas potenciales de muestreo. El error asociado al análisis fue evaluado examinando el control de filtros blanco. Durante las pruebas de campo, la diferencia del blanco del

laboratorio fue de $0.2 \pm 0.7 \mu\text{g}$ con una desviación estándar de $6.9 \mu\text{g}$ ($n=100$). El promedio de diferencias entre el blanco de transporte fue de $+5.7 \pm 1.6 \mu\text{g}$ con una desviación estándar de $12.8 \mu\text{g}$ ($n=64$). El promedio del blanco de campo para las entradas de MINIVOL PM_{10} fue de $+11.6 \pm 2.3 \mu\text{g}$ con desviación estándar de $12.1 \mu\text{g}$ ($n=28$). Para las entradas del MINIVOL $\text{PM}_{2.5}$ fue de $+6.9 \pm 1.9 \mu\text{g}$ con un $\pm 8.9 \mu\text{g}$ de desviación estándar ($n=23$). Los resultados sugieren que la colección pasiva de de partículas pueden ocurrir durante condiciones estáticas del muestreador, especialmente con el de PM_{10} .

- b. Evaluación de Precisión.** La precisión del MINIVOL fue determinada basándose en comparaciones con otros equipos colocados para medir masas de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$. Las cargas de los filtros no fueron corregidas por blancos en el laboratorio, transporte o campo. La normalización de la información fue verificada con tablas de valores (p -valores > 0.1).

El promedio de diferencia entre los muestreadores base de PM_{10} fue de $0.29 \pm 0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con una desviación estándar de $2.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un coeficiente de variación (COV) de 8.6%. La máxima diferencia entre las medidas de concentración de los muestreadores base fue $7.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ la segunda más alta fue de $5.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El promedio de diferencia entre los muestreadores base de $\text{PM}_{2.5}$ fue de $0.12 \pm 0.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con una desviación estándar de $1.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un coeficiente de variación (COV) de 12.7%. La máxima diferencia entre las medidas de concentración de los muestreadores base fue $4.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ la segunda más alta fue de $3.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

- c. Evaluación de Comparación.** La diferencia promedio entre el VAPS y MINIVOL en 24 h de muestreo para PM_{10} fue de $0.69 \pm 0.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (VAPS fue mayor) con una desviación estándar de $4.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un COV de 18.8% (medida promedio = $25.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $n=27$). La máxima diferencia entre los muestreadores VAPS y el MINIVOL fue de $13.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la segunda más alta de $10.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La diferencia promedio entre el VAPS y MINIVOL en 24 h de muestreo para $\text{PM}_{2.5}$ fue de $1.07 \pm 0.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (MINIVOL fue mayor) con una desviación estándar de $2.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un

COV de 24.1% (medida promedio=11.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, n=36). La máxima diferencia entre los muestreadores VAPS y el MINIVOL fue de -7.74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, la segunda más alta de +5.89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La diferencia promedio en mediciones de concentración entre el TEOM y el MINIVOL para un periodo 24 h fue de $2.21 \pm 0.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un COV 16.2% (medida promedio de = 24.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, n=43). La diferencia máxima entre los muestreadores base (TEOM) y los MINIVOL fue de +10.88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el segundo más alto fue de +10.73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Los factores ambientales, que pueden haber contribuido a diferencias de medición entre el MINIVOL, el VAPS y el TEOM fueron examinados respectivamente. Estos factores incluyen el promedio diario en la concentración de PM_{10} ambiental (del VAPS o TEOM), máximo 1 h de concentración PM_{10} (TEOM), promedio de velocidad de viento, máximo de velocidad de viento en 2 min, máximo de velocidad de viento en 5 s, dirección promedio de viento, temperatura mínima, temperatura máxima, temperatura media y humedad absoluta durante el periodo de muestreo en el lugar de monitoreo.

Un componente principal del análisis fue realizado en la matriz de correlación para determinar los factores ambientales independiente. Los resultados indicaron que los componentes ambientales independientes podrían ser categorizados como concentraciones ambientales de PM (promedio y máximo en 1 h), velocidad de viento (promedio, máximo en 2 min y máximo en 5 s), dirección del viento y temperatura (máxima, mínima, promedio y humedad absoluta) basándose en la evaluación de las medidas colectadas durante el periodo de estudio.

Un análisis múltiple de regresión fue realizada para las variables independientes para determinar la influencia relativa de estos componentes en la diferencia de medición entre los sistemas de muestreo. La combinación de variables independientes, que explica la cantidad máxima de varianza en la data, fue reportada. La dirección no

fue incluida ya que este factor no puede ser cuantificado con respecto a otros parámetros (tabla 4.9).

Tabla 4.9. Relaciones entre los métodos de muestreo y factores ambientales.

Table 1
Relationships between sampling methods and environmental factors^a

Metl.	Size fraction		R	n
VAPS	PM ₁₀	$0.85 - 0.18(C_{PM_{10}} - 0.12)WS_{2min} + 0.23(AH)$	0.24	27
VAPS	PM _{2.5}	VAPS-MV $3.02 - 0.07(C_{PM_{2.5}} - 0.06)WS_{5s} + 0.01(AH)$	0.13	26
TEOM	PM ₁₀	TEOM-MV $2.3 - 0.16(C_{PM_{10}} - 0.01)WS_{5s} + 0.01(T_{amb})$	0.25	43

^a Definitions: $C_{PM_{10}}$ = 24-h average ambient PM₁₀ concentration (µg/m³); $C_{PM_{2.5}}$ = 24-h average ambient PM_{2.5} concentration (µg/m³); WS_{2min} = 24-h maximum 2-min wind speed (km/h); WS_{5s} = 24-h maximum 5-s wind speed (km/h); AH = 24-h average absolute humidity (g/m³); T_{amb} = 24-h minimum temperature (°C).

La ecuación de regresión VAPS-MINIVOL para el PM₁₀ sugiere que la concentración ambiental, la velocidad máxima del viento en 2 min y la humedad absoluta tuvieron un efecto en la lectura de las mediciones. No obstante, la sensibilidad de estos factores fue menor que la producida por el muestreo del PM₁₀.

La ecuación de regresión TEOM-MINIVOL para el PM₁₀ sugiere que las mediciones del TEOM se incrementaron relativamente con respecto a las del MINIVOL con un aumento en la concentración ambiental, velocidad del viento y temperatura. La relación entre temperatura y la diferencia TEOM-MINIVOL fue atribuida a las características operativas del TEOM. Algunos autores han demostrado que las concentraciones de PM₁₀ del TEOM son sesgadas negativamente en días de temperaturas bajas. Estos estudios notaron que ocurrió volatilización de algunos componentes orgánicos de PM como un resultado de del acondicionamiento del aire muestreado. La entrada del TEOM y su cámara de aire fueron mantenidas a 50 °C para prevenir pérdida de precisión debido a la expansión o contracción térmica durante las variaciones de temperatura. La ecuación de regresión muestra que la diferencia de las mediciones entre el TEOM y el MINIVOL disminuye mientras la temperatura aumenta.

La eficiencia de colección del MINIVOL fue influenciada por la velocidad del viento en todos los análisis. La entrada no está diseñada isocinéticamente, así, el flujo del aire alrededor de cobertor lluvia requiere dos cambios de dirección de 90°. A medida que la velocidad del viento se incrementa, el momentum de las partículas asciende y el punto de corte de la entrada del equipo descenderá.

El porcentaje de eficiencia de captura en la entrada del MINIVOL comparada con un equipo isocinético basado en muestreo replicado a una misma velocidad del viento se puede observar en la figura 4.42. La información muestra que la eficiencia de aspiración de la entrada disminuye a medida que la velocidad el viento asciende.

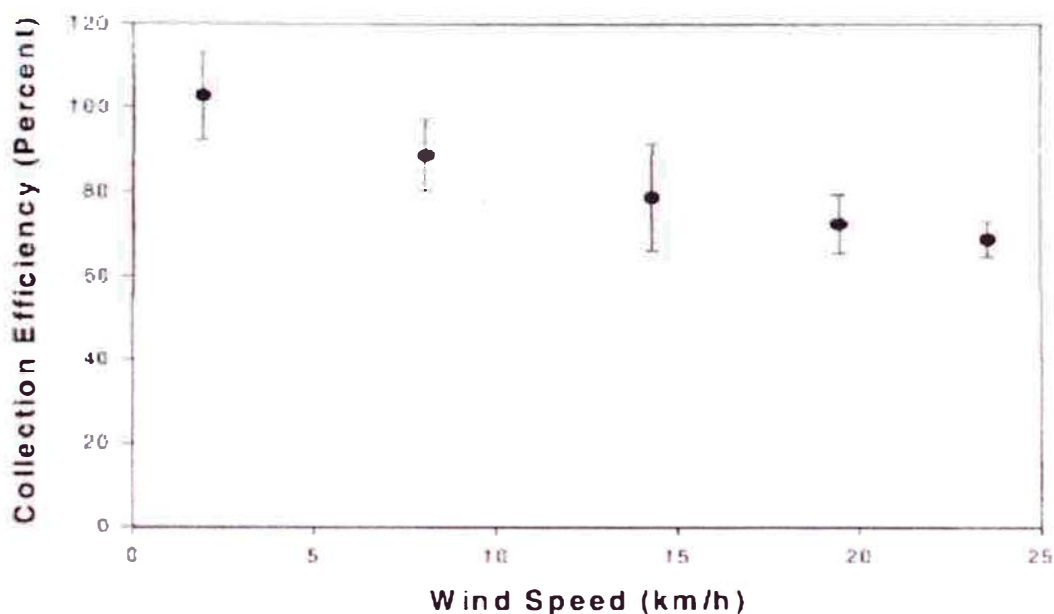


Figura 4.42. Comparación de la eficiencia de colección del MINIVOL vs. la velocidad del viento.

En conclusión al evaluación del MINIVOL indicó que el muestreador: operó de forma confiable y generó estadísticamente concentraciones similares cuando se colocó otro MINIVOL ($r^2=0.96$ para mediciones de PM_{10} y $=0.95$ para $PM_{2.5}$). De esta manera, la caracterización de la distribución espacial de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ con el MINIVOL puede ser alcanzada con mayor nivel de confianza.

El MINIVOL también produjo resultados estadísticamente comparables con los del VAPS ($r^2=0.83$ para PM_{10} y $r^2=0.86$ para $PM_{2.5}$) y del TEOM ($r^2=0.90$). Los factores ambientales como la concentración ambiental, velocidad del viento, temperatura y humedad influenciaron relativamente la comparación entre estos sistemas de muestreo. Los resultados también indicaron que la colección pasiva de material particulado aéreo ocurrieron en la entrada del MINIVOL durante condiciones ajenas al monitoreo (Baldauf, et al., 2001).

4.2. MARCO LEGAL

4.2.1. Marco Legal Internacional

En el inicio de los estudios de los polvos contaminantes se estipuló que las partículas con diámetro menor a 10 μ eran responsables por la mayoría de problemas relacionados a la salud, en especial con los pulmones y corazón. Esto, como ya se ha señalado, tiene que ver con la capacidad que tienen estas partículas para alcanzar regiones alejadas de la región pulmonar. Como el análisis de PTS incluyen partículas de todo tamaño, y ello no permite un indicador satisfactorio para relacionarlo con los efectos a la salud, en julio de 1987 la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés) promulgó un nuevo estándar de calidad específico para las partículas primarias en el aire. Esta nueva norma reemplazó la anterior para PTS con un nuevo indicador que incluía las partículas de diámetro inferior a 10 μm , que más tarde se conocerían como PM_{10} . Los nuevos estándares basados en términos de salud para mediciones de 24 h se fijaron en $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y con no más de un episodio por año (Federal Register, 1987). No obstante, en julio de 1997 USEPA revisó el estándar diario para PM_{10} , así también incluyó estándares anuales y diario para $\text{PM}_{2.5}$ (Federal Register, 1997).

La Unión Europea (EU, por sus siglas en inglés) ha adoptado el valor límite para *material particulado en suspensión expresado como PM_{10} en $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$* (concentración promedio para 24 h) y de no exceder 35 veces por año con una concentración anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En la Declaración de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano, llevada a cabo en Estocolmo, del 5 al 16 de junio de 1972, se proclama que la protección y el mejoramiento del medio ambiente humano es una cuestión fundamental que afecta al bienestar de los pueblos y al desarrollo económico del mundo entero, un deseo urgente de los pueblos de todo el mundo y un deber de todos los gobiernos. La defensa y el mejoramiento del medio ambiente humano para las generaciones presentes y

futuras se han convertido en meta imperiosa de la humanidad, y ha de perseguirse al mismo tiempo que las metas fundamentales ya establecidas de la paz y el desarrollo económico y social en todo el mundo, y de conformidad con ellas.

Además, uno de los principios establecidos en la misma, el principio 2, establece que los recursos naturales de la tierra, incluidos el aire, el agua, la tierra, la flora y la fauna y especialmente muestras representativas de los ecosistemas naturales, deben preservarse en beneficio de las generaciones presentes y futuras mediante una cuidadosa planificación u ordenación, según convenga. En el principio 6 proclama que debe ponerse fin a la descarga de sustancias tóxicas o de otras materias y a la liberación de calor, en cantidades o concentraciones tales que el medio no pueda neutralizarlas, para que no se causen daños graves irreparables a los ecosistemas. Debe apoyarse la justa lucha de los pueblos de todos los países contra la contaminación.

En la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, llevada a cabo en Río de Janeiro, del 3 al 14 de junio de 1992, se proclamó que los Estados tienen el derecho soberano de aprovechar sus propios recursos según sus propias políticas ambientales y de desarrollo, y son ellos mismos quienes tienen la responsabilidad de velar porque las actividades realizadas dentro de su jurisdicción o bajo su control no causen daños al medio ambiente de otros Estados o de la zona que están fuera de los límites de la jurisdicción nacional.

La Unión Europea, en su directiva 1996/62/CE, del 27 de septiembre de 1996, sobre evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente, establece una estrategia dirigida a definir los objetivos de calidad del aire ambiente para evitar, prevenir o reducir los efectos nocivos para la salud humana y el medio ambiente en su conjunto, a evaluar y disponer información sobre la calidad del aire y a mantener una buena calidad del aire ambiente o mejorarla en caso necesario, fijando unos objetivos de calidad del aire, con límites para determinados contaminantes, que han de alcanzarse mediante una planificación adecuada, adoptando para ello las medidas adecuadas que

tengan en cuenta un enfoque integrado para la protección del aire, el agua y el suelo.

Esta Directiva fue desarrollada por la Directiva 1999/30/CE del Consejo, del 22 de abril de 1999, relativa a los valores límites de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, partículas y plomo en el ambiente, la Directiva 2000/69/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, del 16 de noviembre de 2000, sobre los valores límites para el benceno y el monóxido de carbono en el aire ambiente, la Directiva 20/3/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de febrero de 2002, relativa al ozono en el aire ambiente y la Directiva 2004/107/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de diciembre de 2004, relativa al arsénico, el cadmio, el mercurio, el níquel y los hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire ambiente.

El 13 de marzo del 2001, el Grupo de Trabajo de la Comisión Europea sobre *Material Particulado Atmosférico* se planteó los siguientes objetivos:

- Redactar una guía que sirviera para asesorar acerca de cómo demostrar la *equivalencia y para ayudar a los Estados Miembros a cumplir los requerimientos de la Directiva 1999/30/CE.*
- Redactar recomendaciones para la obtención de los factores o ecuaciones de *corrección que se pueden aplicar a los datos obtenidos por métodos de medición para PM₁₀, distintos a los establecidos en la Directiva 1999/30/CE, con el fin de obtener resultados equivalentes.*
- Redactar recomendaciones respecto a los factores de corrección por defecto, o de seguridad, que deben ser aplicados por los Estados Miembros que no hayan completado los ejercicios de intercomparación a tiempo para la aplicación de la Directiva.
- El Grupo debería también asesorar sobre los métodos para demostrar *cuando las superaciones de los valores límites de PM₁₀ son debidas a eventos naturales.* Durante el Congreso sobre material particulado en

suspensión, celebrado en Venecia, se acordó que los métodos presentados por España y el Reino Unido eran suficientes para demostrar la influencia de los procesos de transporte a larga distancia, y que estos métodos se publicarían para su difusión.

En 1998, el Congreso de los Estados Unidos amplió los fondos para el Programa de Investigación de Materia Particulada de la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés), con el fin específico de acelerar la investigación de el rol que la Materia Particulada (PM) tiene en los efectos asociados a la salud debido a la contaminación del aire y para apremiar a la ciencia a apoyar la implementación de medidas regulatorias. Desde entonces la investigación de la EPA sobre PM ha sido realizada dentro de un marco científico desarrollado por un comité de expertos designado por el Consejo Nacional de Investigación (NRC por sus siglas en inglés) de la Academia Nacional de Ciencias. El Comité de la NRC emitió una serie de reportes titulados *Prioridades de Investigación para la Materia Particulada en el aire*, que ayudó a la agenda de investigación a dirigir las preguntas claves acerca de PM y proveyó periódicos informes de progreso.

En el 2005, la Organización Mundial de la Salud emitió sus Lineamientos de Calidad del Aire, los cuales están designados para ofrecer una guía para reducir los impactos a la salud que produce la contaminación del aire basados en la evaluación experta de evidencia científica actual. Esto ha producido un incremento en la concientización de científicos y políticos sobre el alcance global de los problemas públicos de salud relacionados a la exposición a la contaminación del aire.

Finalmente se hace un recuento entre las principales leyes ambientales que rigen el medio ambiente en la región se puede citar:

- Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente (Colombia, 1974)
- Ley Orgánica del Ambiente (Venezuela, 1976)

- Ley para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental (Ecuador, 1976)
- Ley que dispone sobre Política Nacional del MA; fines, mecanismos de formulación y aplicación y establece otras providencias (Brasil, 1981)
- Ley para la Protección y Mejoramiento del M.A. (Guatemala, 1986)
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (Méjico, 1988) Sustituyó a la LFPA de 1982 y ésta a la de 1971.
- Código del Medio Ambiente y los Recursos Naturales (Perú, 1990)
- Ley General del Medio Ambiente (Bolivia, 1992)
- Ley General del Ambiente (Honduras, 1993)
- Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente (Chile, 1994)
- Ley Orgánica del Ambiente (Costa Rica, 1995)
- Ley General del MA y los Recursos Naturales (Nicaragua, 1996)
- Ley sobre el M.A. (Cuba, 1997) Sustituyó Ley 33 de 1981
- Ley del Medio Ambiente (El Salvador, 1998)
- Ley General del Ambiente (Panamá, 1998)
- Ley General sobre MA. Y RR.NN (República Dominicana, 2000)
- Ley General de Protección Ambiental (Uruguay, 2000)
- Ley General del Ambiente (Argentina, 2002)
- Ley General del Ambiente (Perú, 2005)

4.2.2. Marco Legal Nacional

La Constitución Política del Perú, en el Artículo 2º, inciso 22, establece que es deber primordial del Estado garantizar el derecho de toda persona a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida; mientras que en el artículo 67 del título III, capítulo 2 - Del Ambiente y los Recursos Naturales -, aclara que es el Estado quien determina la política nacional del ambiente y promueve el uso sostenible de sus recursos naturales.²

La Ley General del Ambiente N°28611 establece principios y normas básicas para proteger y asegurar un ambiente saludable que permita mejorar la calidad

² Constitución Política del Perú

de vida de la población y, por otro, el respetar la institucionalidad del Estado y evitar convertirse en un obstáculo para el crecimiento, la generación de empleo y la reducción de la pobreza. La LGA permite regular mejor, reordenar el marco normativo y fortalecer la autoridad nacional ambiental, a la vez que otorga funciones de fiscalización y sanción al Consejo Nacional del Ambiente (CONAM) para definir o dictaminar cuando no haya acuerdo entre los sectores que tienen la responsabilidad ante un caso determinado³.

Mediante el Decreto Supremo N° 074-2001-PCM se aprobó el Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire con el objetivo de proteger la salud y aprobar los lineamientos de estrategia para alcanzarlos progresivamente. Siendo los Estándares de Calidad Ambiental del Aire, un instrumento de gestión ambiental prioritario para prevenir y planificar el control de la contaminación del aire sobre la base de una estrategia destinada a proteger la salud, mejorar la competitividad del país y promover el desarrollo sostenible. El impacto de la contaminación del aire en la salud de las personas se presenta principalmente de dos formas. La primera en forma de contaminación crónica por espacios de tiempo prolongados y sostenidos y la segunda, en forma de contaminación aguda a través de exposiciones de corta duración que requieren de medidas inmediatas destinadas a reducir la concentración del contaminante en el aire y disminuir la exposición de la población a dichos contaminantes.⁴

Mediante Decreto Supremo N° 009-2003-SA se aprobó el Reglamento de los Niveles de Estados de Alerta Nacionales para Contaminación del Aire. El mismo que consta de 10 artículos, 3 Disposiciones Complementarias y 1 Anexo Referencial. El cual tiene por objeto regular los niveles de estados de alerta para contaminante del aire, los cuales se establecen a efectos de activar, en forma inmediata, un conjunto de medidas predeterminadas de corta duración destinadas a prevenir el riesgo a la salud y evitar la exposición

³ Ley General del Ambiente – Ley N° 28611

⁴ Decreto Supremo N° 074-2001-PCM

excesiva de la población a los contaminantes del aire durante episodios de contaminación aguda.⁵

Mediante Resolución Ministerial RM 026-2000-ITINCI/DM se aprueba el Protocolo de Monitoreo de Efluentes Líquidos y Emisiones Atmosféricas, el cual busca monitorear la gran variedad de efluentes líquidos provenientes de los procesos y operaciones industriales, cada una de las cuales tiene características propias que afectan al medio ambiente en forma diferente; fomentar la prevención de la contaminación, la producción más eficiente y determinar los límites máximos permisibles (LMP) para el Sector Industrial Manufacturero.⁶

El Consejo Nacional del Ambiente (CONAM), en armonía con el artículo 10 de la Ley 28245, Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental, tiene la facultad de dictar normas de carácter transectorial requeridas para definir acciones que garanticen la calidad ambiental y estimulen entre otras actitudes ambientalmente responsables.⁷ En virtud de ello, el año 2003 fue promulgado el Decreto Supremo N° 009-2003-SA que aprueba el Reglamento de los Niveles de Estados de Alerta Nacionales para Contaminación del Aire con el objetivo de proteger la salud y aprobar los lineamientos de estrategia para alcanzarlos progresivamente.⁸ En el mismo se establece en su Tercera Disposición Complementaria que el CONAM emitirá mediante Decreto de Consejo Directivo, de conformidad a lo establecido en el literal “c” del artículo 27 de su Reglamento y en coordinación con la DIGESA, una directiva para la aplicación del citado Reglamento. Esta Directiva fue publicada en el año 2005 - Directiva N° 015-2005-CONAM-CD -, y planteó como el objetivo a alcanzar, reducir al mínimo posible y al menor costo económico social, la exposición de la población a eventos críticos de contaminación que pongan en riesgo su salud, así como a evitar el empeoramiento de la contaminación del aire durante el mencionado episodio. Para dicho fin, se usa el Método de

⁵ Decreto Supremo N° 009-2003-SA

⁶ RM 026-2000-ITINCI/DM

⁷ Ley General del Ambiente – Ley N° 28611

⁸ Decreto Supremo N° 009-2003-SA

referencia para la determinación de material particulado respirable como PM10 en la atmósfera.⁹

El Decreto Supremo N° 074-2001-PCM en su Artículo 4 establece los estándares primarios de calidad del aire y los niveles de concentración máxima (Tablas 4.10, 4.11, 4.12)¹⁰:

Tabla 4.10. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire

Contaminante	Periodo	Forma del estándar		Método de análisis ¹
		Valor	Formato	
Dióxido de Azufre	Anual	80	Media aritmética anual	Fluorescencia UV (método automático)
	24 horas	365	NE más de 1 vez al año	
PM-10	Anual	50	Media aritmética anual	Separación inercial /filtración (gravimetría)
	24 horas	150	NE más de 3 veces/año	
Monóxido de carbono	de 8 horas	10000	Promedio móvil	Infrarrojo no dispersivo IRND (método automático)
	1 hora	30000	NE más de 1 vez al año	
Dióxido de nitrógeno	1 hora	200	NE más de 24 veces/año	Quimiluminiscencia (método automático)
	Anual	100	Promedio aritmético anual	
Ozono	8 horas	120	NE más de 24 veces/año	Fotometría UV (método automático)
Plomo	Anual ²	0.5	Promedio aritmético mensual	Método PM-10 (espectrofotometría de absorción atómica)
	Mensual	1.5	NE más de 4 veces/año	

⁹ Directiva N° 015-2005-CONAM-CD

¹⁰ Decreto Supremo N° 074-2001-PCM

Sulfuro de hidrógeno	24 horas	Fluorescencia UV (método automático)
----------------------	----------	---

1 O método equivalente aprobado

2 Determinado en el D.S. N° 069-2003-PCM

Tabla 4.11. Valores de tránsito

Contaminante	Periodo	Forma del estándar			Método de análisis ¹
		Valor	Formato		
Dióxido de Azufre	Anual	100	Media anual	aritmética	Fluorescencia UV (método automático)
PM-10	Anual	80	Media anual	aritmética	Separación inercial /filtración (gravimetría)
	24 horas	200	NE más de 3 veces/año		
	1 hora	30000	NE más de 1 vez al año		
Dióxido de nitrógeno	1 hora	250	NE más de 24 veces/año		Quimiluminiscencia (método automático)
Ozono	8 horas	160	NE más de 24 veces/año		Fotometría UV (método automático)
Plomo	Anual	1.0	Promedio mensual	aritmético	Método PM-10 (espectrofotometría de absorción atómica)

1 O método equivalente aprobado

Tabla 4.12. Valores referenciales

Contaminante	Periodo	Forma del estándar		Método de análisis ¹
		Valor	Formato	
PM-2.5	Anual	15		Separación inercial /filtración (gravimetría)
	24 horas	65		

1 O método equivalente aprobado

Todos los valores son concentraciones en microgramos por metro cúbico, NE significa no exceder. El método de análisis puede también ser un método equivalente aprobado.

El Decreto Supremo N° 069-2002-PCM determina el valor anual de plomo el cual se ha incluido en el anexo 1 y anexo 2 del Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

5.1. HIPÓTESIS, VARIABLES Y OBJETIVOS

5.1.1. Hipótesis

La hipótesis principal sobre la cual se desarrolla la presente investigación *es que la concentración de PM_{10} en la cuenca atmosférica de Pisco e cede los niveles regulados en los Estándares Nacionales de Calidad de Aire.*

Además se tienen hipótesis secundarias sobre la existencia de fuentes *específicas, generadoras de material particulado, que se relacionan con las zonas de mayor concentración en el área de estudio; y que la mayor proporción de la población que habita las zonas urbanas se encuentra expuesta a niveles de concentración de PM_{10} superiores a lo estipulado en la norma.*

5.1.2. Variables

5.1.2.1. Dependientes:

- a. Concentración de material particulado respirable (PM_{10})
- b. Población expuesta al contaminante.

5.1.2.2. Independientes:

- a. Existencia, tipo y ubicación de fuentes generadoras de PM_{10} .
- b. Densidad poblacional.

5.1.2.3. Intervenientes:

- a. Presión atmosférica.

- b. Temperatura.
- c. Humedad.
- d. Velocidad y dirección del viento
- e. Fenómenos atmosféricos (vientos Paracas).

5.1.3. **Objetivos**

- Determinar la concentración de PM_{10} en el aire en el área urbana de *la provincia de Pisco, en especial la ciudad de Pisco.*
- Analizar la concentración de PM_{10} en la zona de estudio con respecto *a los valores indicados en los Estándares Nacionales de Calidad de Aire.*
- Identificar las zonas de mayor exposición y las posibles fuentes de *generación de PM_{10} dentro del área de estudio.*
- Graficar las curvas de isoconcentración de PM_{10} dentro de la ciudad *de Pisco y la zona comprendida en el área de estudio.*

5.2. **MÉTODOS, MATERIALES Y EQUIPOS**

5.2.1. **Metodología**

5.2.1.1. **Estaciones de Muestreo.** La selección de las estaciones de muestreo se *realizó con el objeto de evaluar el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental (ECAs) en el área urbana de la zona de estudio.* La ubicación inicial fue determinada en base a criterios de equidistancia, *orientados al estudio y monitoreo de la calidad de aire en la cuenca atmosférica de Pisco, y fue llevada a cabo por CONAM, DIGESA, SENAMHI y otras organizaciones en años anteriores.* Dichas estaciones *han sido sistematizadas y geofrenciadas por GESTA Pisco en el 2004, o utilizadas para la determinación de contaminantes en el aire de la cuenca atmosférica por Klepel Consulting en 2005.* La mayoría de estas reproduce

la ubicación exacta de los anteriores puntos de muestreo. Cuando esto no fue posible, se ubicó a una distancia no mayor de 250 m.

La metodología usada, denominada *método rejilla*, consiste en generar puntos de muestreo representativos que abarquen toda el área de estudio, basados en criterios de equidistancia, densidad poblacional, zonas especiales, puntos accesibles, seguridad, etc.

5.2.1.2. Recolección de Muestras. La recolección de muestras se realizó usando el equipo *MiniVol Portable Air Sampler® con medio filtrante de microfibra* de cuarzo. Este equipo es un muestreador de aire ambiental para material particulado y gases no reactivos que opera con *tecnología de bajo flujo desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency – EPA) y la Autoridad Regional para la Polución Vial de Aire (Lane Regional Air Pollution Authority) de Estados Unidos*. En su modalidad de recolección de material particulado, la separación de partículas según su tamaño se realiza en el dispositivo de ingreso, el cual cuenta con un impactor cuyas características selectivas dependen del flujo de aire que choca contra la placa de impacto. Las partes del equipo fueron diseñadas para la recolección de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ a un flujo nominal de 5 lpm (Airmetrics, 2006).

5.2.1.3. Manejo de Muestras. Para la determinación de la concentración de PM_{10} en el aire muestreado se usó el método gravimétrico basado en las leyes de conservación de la masa para cada uno de los filtros.

5.2.1.4. Cálculos y Manejo de Datos. La concentración de PM_{10} fue calculada según la ecuación 1, corregida para el volumen en condiciones estándar de temperatura (273°K) y presión atmosférica (760 mmHg). Esta corrección del volumen muestreado para cada muestra se desarrolló de acuerdo a lo indicado por el fabricante del equipo en el manual de operación¹ (Airmetrics, 2006).

¹ Las correcciones de presión y temperatura son consistentes con lo indicado en el "Protocolo de monitoreo de la calidad de aire y gestión de los datos" (DIGESA, 2006).

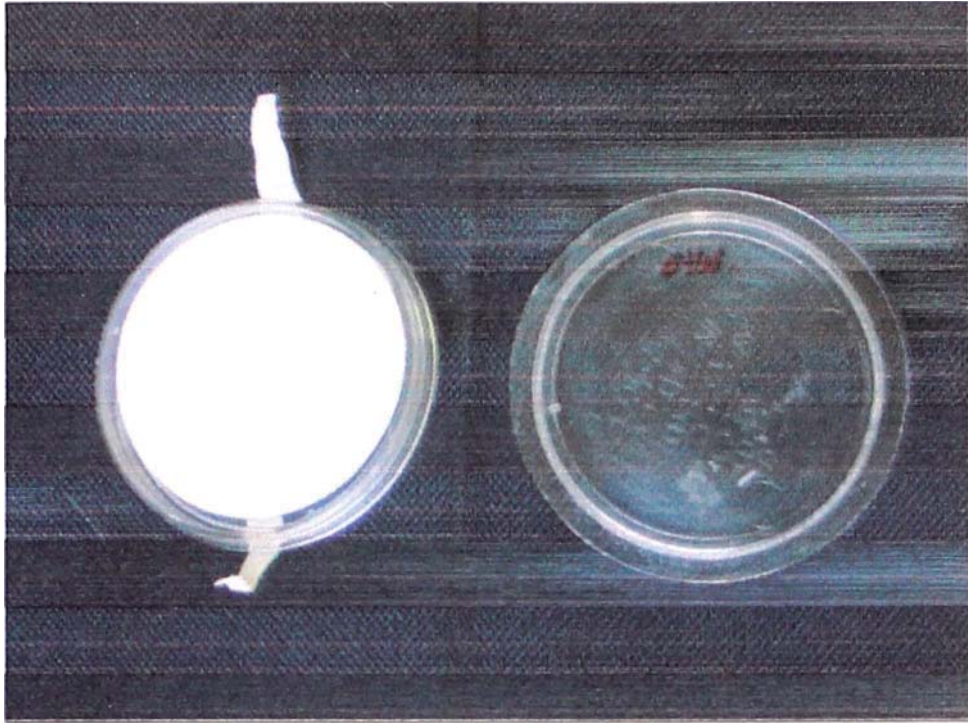


Figura 5.1. Filtros de microfibras de cuarzo (37 mm de diámetro y 5 μm de poros) y portafiltro

$$[PM_{10}] = \frac{W_{particulas}}{V_{std}} \quad (1)$$

$[PM_{10}]$: Concentración de PM_{10} , $\mu\text{g}/\text{m}^3$

V_{std} : Volumen corregido para condiciones estándar, m^3

5.2.2. Materiales y Equipos

- Filtros de microfibras de cuarzo de 37 mm de diámetro y 5 μm de tamaño de poro o equivalente.
- Portafiltros de plástico (Gelman Science) de 37 mm y sellado con cinta adhesiva o banda ajustable de celulosa.
- Minivol Portable Air Sampler® (Airmetrics, 2004), en su modalidad de muestreador de material particulado respirable (PM_{10}).



Figura 5.2. Equipo Minivol Portable Air Sampler® instalados en estación de muestreo

- Balanza microanalítica de 100 μg con sensibilidad de 0.01 μg .
- GPS eTrex Vista™ Personal Navigator (GARMIN, 2005).

5.3. TIPO DE ESTUDIO

El análisis de la distribución de PM_{10} desarrollado en el presente trabajo se identifica como un estudio descriptivo (según la clasificación planteada por Danhke en 1989) de la presencia de dicho contaminante en el aire ambiental del área de estudio (provincia de Pisco, en especial el área urbana del distrito de Pisco).

Dicho análisis se realizó mediante toma de muestras de PM_{10} en 17 estaciones, asumidas de estudios anteriores llevados a cabo por diversas instituciones dedicadas al muestreo de calidad de aire en la zona.

5.4. DISEÑO DE LA INVESTIGACION²

La investigación aplicada corresponde al tipo de *investigación no experimental* en la cual se ha medido la concentración de PM₁₀ sin intervenir directamente en las variables de las cuales depende. A excepción de la ubicación de las estaciones de muestreo, ninguna de las *variables independientes o intervinientes han sido, ni pueden ser,* modificadas en el desarrollo del estudio. La ubicación de la estación de muestreo, que define la distancia a las fuentes generadoras de PM₁₀ no fue *determinada de manera expresa para el presente estudio, habiéndose* adoptado de otras definidas en años anteriores para el estudio de otros contaminantes en el aire.

En función a los objetivos, se planteó un *diseño transeccional descriptivo* para describir la concentración de PM₁₀ y su distribución en la zona de estudio, así como compararlo con la Reglamentación Nacional vigente. La identificación de posibles fuentes trata de seguir un *diseño transeccional correlacional*, sin llegar a establecer parámetros o coeficientes para medir el grado de correlación con las variables. Finalmente para determinar la existencia de variaciones estacionales de la concentración de PM₁₀ se adoptó un *diseño longitudinal de tendencia*.

² Los diseños de investigación mencionados en el presente documento siguen la clasificación propuesta por Hernández, Fernández y Baptista, en *"Metodología de la Investigación"* McGraw Hill, 2003.

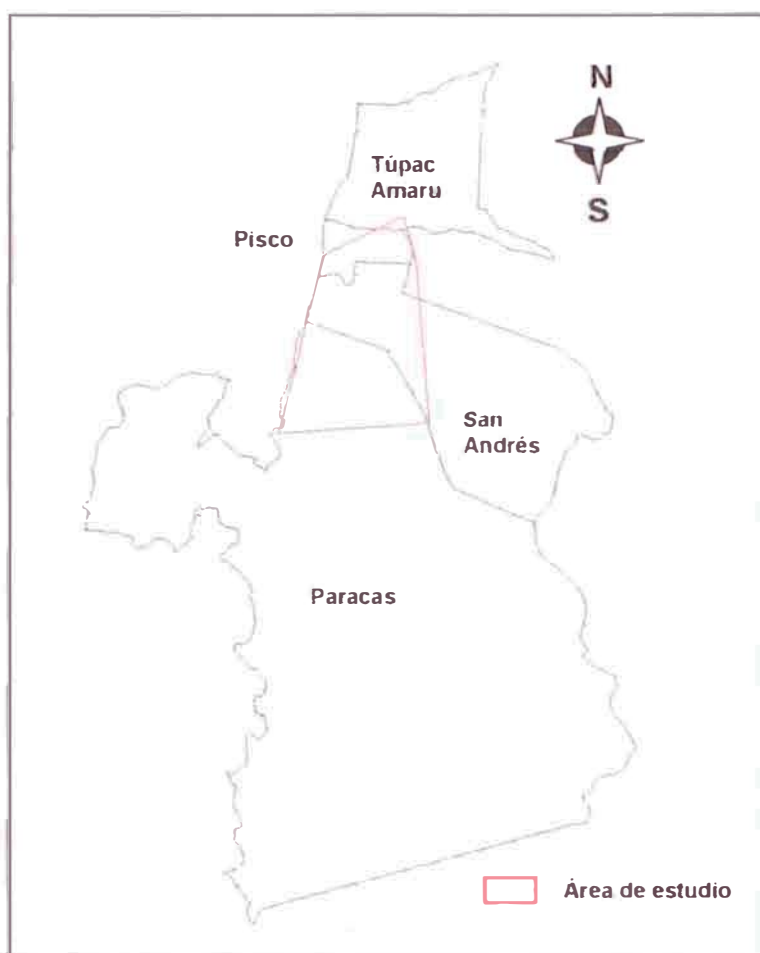


Figura 5.3. Área de estudio, límites de los distritos incluidos y cuenca atmosférica de Pisco.

5.5. MONITOREO

5.5.1. Area de Estudio

El monitoreo de PM_{10} se desarrolló en cinco distritos de la provincia de Pisco: Pisco, Paracas, San Andrés, San Clemente y Túpac Amaru (Figura 5.1.), a través de 17 estaciones de para la toma de muestras (9 en el distrito de Pisco y 2 en cada uno de los distritos restantes). El área de estudio es aquella comprendida dentro del polígono formado por las estaciones de muestreo E-3, E-10, E-11, E-12, E-14, E-16, E-17 (Tabla 5.1.), cubriendo un área total de 150.26 km².

.5.2. Estaciones de Muestreo

Como se mencionó, la ubicación de las estaciones de muestreo fue *adoptada de trabajos anteriores de análisis y monitoreo de la calidad del aire* en la zona de estudio. Estas estaciones se encuentran distribuidas en la zona urbana de los cinco distritos y centros poblados comprendidos en el *área de estudio*.

Las estaciones de muestreo se ubicaron por lo general en las azoteas de *viviendas o edificaciones del Estado (centros de salud, centros de abastecimiento de agua, instituciones, etc.)* con alturas promedias entre 4 y 10 m. Se dispuso de estas zonas para la determinación de las partículas *por motivos de representatividad y seguridad*.

Dichos puntos han observado los criterios evaluados por las posibles *turbulencias, obstáculos y zonas directas de producción de contaminantes* para que los datos obedezcan a parámetros de calidad ambiental.

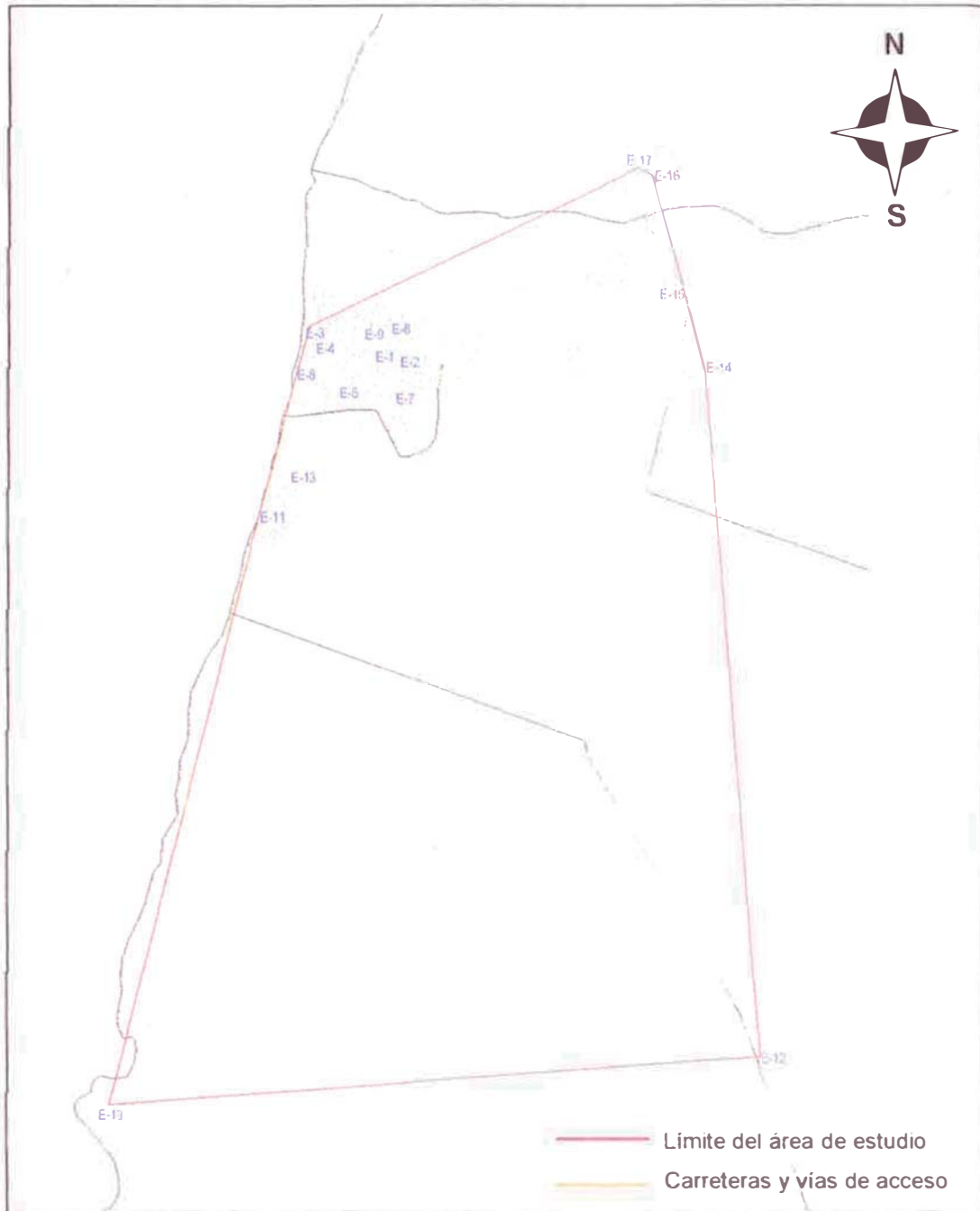


Figura 5.4. Ubicación de estaciones de muestreo en el área de estudio.

Tabla 5.1

Ubicación de las estaciones de muestreo en la recopilación de muestras.

Estación de muestreo	Dirección	Distrito	Posición geográfica		Elevación (m.s.n.m.)
			Latitud	Longitud	
<i>Ciudad de Pisco</i>					
E-1. Hotel Regency.	Calle Progreso 117.-123. Plaza de Armas.	Pisco	S13°42'36.7"	WO76°12'13.0"	37.0
E-2. Casa María Huamaní.	Av. Pérez Figueroa A-105.	Pisco	S13°42'38.7"	WO76°11'59.0"	41.0
E-3. EMAPISCO.	Av. Manuel Pardo. Pisco Playa	Pisco	S13°42'20.8"	WO76°13'00.8"	9.0
E-4. Colegio Santo Domingo.	Av. Bolognesi 979. Pisco Playa	Pisco	S13°42'31.9"	WO76°12'51.1"	14.0
E-5. SENATI.	Av. Las Américas. Residencial Paracas	Pisco	S13°43'05.5"	WO76°12'35.9"	53.0
E-6. Hospital San Juan de Dios.	Av. Niño Dios, Pisco	Pisco	S13°42'26.8"	WO76°12'06.6"	24.0
E-7. Frente a C.S. Esperanza.	ProL. Cieneguilla 532. La Esperanza.	Pisco	S13°43'08.5"	WO76°12'09.0"	54.0
E-8. Dr. Casas (Odontólogo).	José Balta 368. Pisco Playa	Pisco	S13°42'31.9"	WO76°13'03.9"	17.0
E-9. Casa Elías Zaravia.	Av. Beatita Humay 521. Fte. Caja Municipal.	Pisco	S13°42'50.7"	WO76°12'20.4"	30.0
<i>Pisco Alrededores</i>					
E-10. Municipalidad de Paracas.		Paracas	S13°50'19.8"	WO76°15'07.2"	18.0
E-11. APRQPISCO.		San Andrés	S13°44'18.7"	WO76°13'32.2"	14.0
E-12. C.S. Santa Cruz.		Paracas	S13°49'52.6"	WO76°08'22.2"	121.0
E-13. C.S. San Andrés		San Andrés	S13°43'53.9"	WO76°13'13.8"	18.0
E-14. Municipalidad Túpac Amaru		Túpac Amaru	S13°40'44.9"	WO76°08'53.6"	102.0
E-15. Ref. P. S. San Miguel		Túpac Amaru	S13°42'09.2"	WO76°09'13.5"	94.0
E-16. Municipalidad San Clemente		San Clemente	S13°40'49.1"	WO76°09'25.4"	103.0
E-17. C.S. San Clemente		San Clemente	S13°40'44.4"	WO76°09'35.0"	96.0



Figura 5.5. Vista satelital de la ubicación de las estaciones de monitoreo en el distrito de Pisco (Estaciones E-1 al E-9).

Fuente: Google Earth v.4.0.2693 beta.



Figura 5.6. Vista satelital de la ubicación de las estaciones de monitoreo en el distrito de Paracas. De arriba hacia abajo (a) Estación E-10. (b) Estación E-12.
Fuente: Google Earth v.4.0.2693 beta.

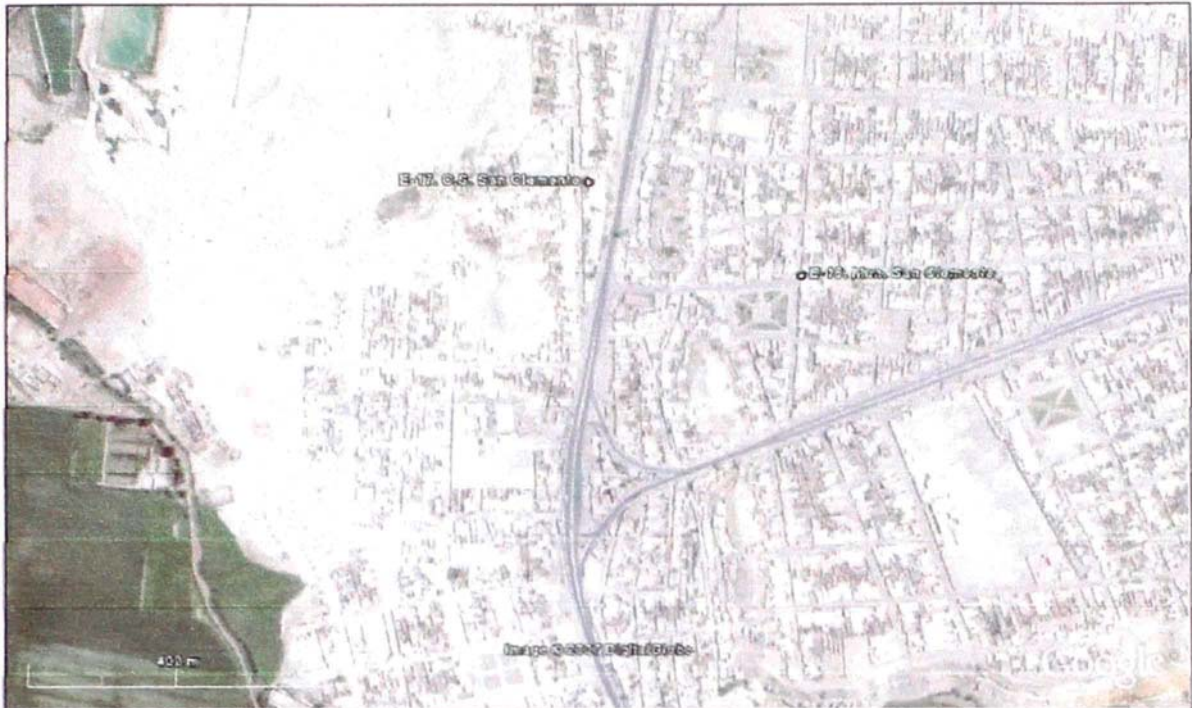


Figura 5.7. Vista satelital de la ubicación de las estaciones de moni` oreo en el distrito de San Clemente (Estaciones E-16 y E-17). Fuente: Google Earth v.4.0.2693 beta.



Figura 5.8. Vista satelital de la ubicación de las estaciones de monitoreo en el distrito de San Andrés (Estaciones E-11 y E-13). Fuente: Google Earth v.4.0.2693



Figura 5.9. Vista satelital de la ubicación de las estaciones de monitoreo en el distrito de Túpac Amaru (Estaciones E-14 y E-15). Fuente: Google Earth v.4.0.2693 beta

5.5.3. Campañás de Muestreo

Se realizaron tres campañas de recolección de muestras entre los meses de febrero del 2005 y enero del 2006 (febrero a mayo del 2005, agosto a setiembre del 2005, y noviembre del 2005 a enero del 2006), obteniéndose un total de 106 registros. Estos datos constituyen la base de información para la cual se desarrollaron la prueba de hipótesis y los análisis mostrados posteriormente.

5.6. PROCEDIMIENTOS

5.6.1. Ubicación del Equipo en las Estaciones de Muestreo

Una vez ubicado el punto de muestreo, se coloca el equipo a unos 10 m de altitud del suelo, de preferencia sobre un pedestal. Lo recomendable es adosarlo a los postes de fluido eléctrico pero por

motivos de seguridad los puntos se han distribuido en dependencias del Estado y residencias de personas afines al proyecto. Así, la colocación del equipo se ha dado en balcones y azoteas, considerando los flujos de viento representativos y alejando el equipo de muros y otros obstáculos que influyan en el muestreo.

5.6.2. Operación del Equipo Muestreador de Aire Ambiental

El manejo y operación del Minivol Portable Air Sampler® se realizó conforme a los procedimientos indicados por el fabricante (Airmetrics) en el manual de operación del equipo. La calibración, cuando fue necesaria, se desarrolló conforme a lo especificado en dicho documento.

5.6.3. Preparación del Filtro

Los filtros de microfibras de cuarzo de 37 mm de diámetro y 5 µm de tamaño de poro o equivalente (y sus respectivos portafiltros) fueron desecados por lo menos dos horas antes de ser pesados. El pesaje fue hecho en una balanza microanalítica, a condiciones controladas de humedad y temperatura. Los pesos fueron registrados por triplicado, descartando aquellos donde la diferencia entre lecturas era mayor a 0.001 mg (1µg). Una vez pesados, los filtros fueron ensamblados en el portafiltro de tal manera que tengan el primer contacto con el aire a muestrear. Los portafiltros fueron cerrados firmemente y con cinta adhesiva para evitar fugas alrededor o el ingreso de humedad.

5.6.4. Instalación de los Filtros en el Equipo de Muestreo

El montaje de los filtros en el equipo Minivol Portable Air Sampler® se realizó conforme lo indicado en el manual de operación.

5.6.5. Recolección de las Muestras

Una vez instalado el filtro, el equipo fue puesto en operación para una *muestra de aire atmosférico, procurando una que la muestra representativa de 24 horas*. Finalizado el tiempo de muestreo los filtros fueron desmontados de acuerdo a lo indicado en el manual del equipo. *Junto con la recolección de las muestras se anotaron las incidencias ocurridas en cada muestreo.*

5.6.6. Medición del Peso de PM₁₀ Muestreado

Luego de la recolección de muestras, el pesaje de los filtros se efectuó de acuerdo a lo siguiente:

- Remoción de la banda de sujeción del portafiltros, apertura del mismo y retiro del filtro.
- El manejo del filtro se realizó por la orilla del mismo para evitar pérdidas de polvo en el proceso.
- En caso el filtro quedase adherido a la parte superior del portafiltro, este se retiró usando una espátula guardando cuidado de no romper el filtro.

Al igual que en la preparación, los filtros fueron pesados en una balanza microanalítica, a las mismas condiciones controladas de humedad y temperatura que en el paso previo. El peso fue registrado por triplicado, descartando aquellos en los cuales la diferencia entre lecturas era mayor a 0.001 mg (1µg).

5.6.7. Cálculos y Manejo de Datos

La concentración de PM₁₀ en la muestra de aire fue calculada como la *división entre el peso de material particulado retenido en el filtro y el volumen de aire muestreado por el equipo, según la ecuación 1.*

Para dicha ecuación, el volumen muestreado corregido para *condiciones estándar se realizó según la relación (Airmetrics, 2006)³:*

$$V_{std} = V_{act} \times \frac{P_{act}}{P_{std}} \times \frac{T_{std}}{T_{act}} \quad (2)$$

V_{act} : Volumen medido, m³

P_{std} : Presión estándar, 1013mb (1atm)

P_{act} : Presión atmosférica en el punto de muestreo, mb

T_{std} : Temperatura estándar, 298 K (25°C)

T_{act} : Temperatura ambiente durante la medición, K

El volumen medido (V_{act}) fue calculado en función del tiempo efectivo *de muestreo asumiendo un flujo constante de 5 l/min, según.*

$$V_{act} = \frac{60 \frac{\text{min}}{\text{hora}} \cdot 5 \frac{\text{l}}{\text{pm}} \cdot t_{\text{muestreo}}}{1000 \frac{\text{l}}{\text{m}^3}} \quad (3)$$

t_{muestreo} : Tiempo total en el que se recolectó la muestra, h

La presión atmosférica en el punto de muestreo fue calculada en función de la elevación del punto y la presión a nivel del mar (P_{nm}) correspondiente⁴:

³ La corrección corresponde a lo especificada por el fabricante en el manual de operación del equipo, y es consistente con lo indicado en el "Protocolo de monitoreo de la calidad de aire y gestión de los datos" (DIGESA, 2005).

⁴ La relación mostrada (4) ha sido modificada de la incluida en el manual del equipo, debido a la conversión de unidades entre pies y metros (1 pie = 0.3048 m).

$$P_{act} = P_{nm} \times \left(1 - \frac{E}{44296.60} \right)^{5.25} \quad (4)$$

P_{nm} : Presión atmosférica a nivel del mar, mb,

E : Elevación sobre el nivel del mar, m

La información climatológica de temperatura y presión usadas en los cálculos fue obtenida de la estación meteorológica SPSO 846910, ubicada en coordenadas *Latitud -13.75, Longitud: -76.28*, correspondiente al aeropuerto de Pisco⁵.

Dado que cada una de las muestras corresponde, en promedio, a 24 horas comprendidas entre dos días consecutivos, los parámetros meteorológicos (P_{nm} y T_{act}) utilizados en las relaciones 2 y 4 fueron calculados como el promedio ponderado entre los promedios diarios de cada parámetro (temperatura y presión medidos en la estación meteorológica) en los días muestreados y el tiempo correspondiente a cada día:

$$X_{(i)} = \frac{\sum_{k=1}^n X_{(k)}^* \cdot t_{(k)}}{\sum_{k=1}^n t_{(k)}} \quad (5)$$

$X_{(i)}$: Parámetro meteorológico (P_{nm} , T_{act} , H.R.) correspondiente al día i

$X_{(k)}^*$: Parámetro (P , T) medido en la estación meteorológica el día k

$t_{(k)}$: Número de horas muestreadas el día k ($k=1$ corresponde al día i)

i : índice correspondiente al día que representa la muestra.

k : índice correspondiente a los días incluidos en la muestra.

n : Número de días entre los cuales se desarrolló la muestra.

⁵ La información meteorológica correspondiente a las fechas en que se realizó el monitoreo se muestran en el Anexo XX.

Los valores de concentración de PM_{10} hallados en el muestreo y en base a los cuales se desarrollan el análisis y la discusión de resultados se muestran en la tabla 5.2, junto con los valores de presión atmosférica y temperatura utilizados para las correcciones indicadas.

Las pruebas estadísticas utilizadas para la validación de hipótesis han sido trabajadas usando el software SPSS v. 12.0 (SPSS, 2003) y Origin Pro v.7.5 (YYY, 2000), mediante los cuales se han procesado los cálculos estadísticos y desarrollado las gráficas posteriormente incluidas en el presente trabajo. Dada la distribución de datos obtenidos, se alternó el uso de pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas, según las características de la muestra. En la exposición de resultados y discusión posterior se indican las pruebas usadas para cada caso en particular.

El trabajo de determinación de la distribución espacial de PM_{10} se desarrolló en base a la ubicación georeferenciada de las estaciones de muestreo usando el software ArcGis Desktop v. 9.1 (ESRI, 2005), Autodesk Land Desktop 2006 (Autodesk, 2006) y Google Earth v. 4.0.2693 (beta) (Google, 2006).

Tabla 5.2.

Monitoreo de la concentración de PM10. Resultados del muestreo de la calidad de aire en la ciudad de Pisco y alrededores.

PUNTO DE MUESTREO	FECHA	FILTRO N°	TIEMPO (h)	PESO (µg)	V _{act} (m ³) ^a	T(°K) ^b	P _{act} (atm) ^b	V _{std} (m ³) ^c	[PM ₁₀] (µg/m ³)
E-1. Hotel Regency	22.02.2005	N-2	24.00	220.0	7.200	295.53	1.0192	7.400	29.73
	23.02.2005	N-3	24.00	320.0	7.200	296.53	1.0192	7.374	43.39
	24.02.2005	N-4	24.60	350.0	7.380	296.54	1.0189	7.556	46.32
	25.02.2005	N-5	23.90	380.0	7.170	296.73	1.0185	7.334	51.82
E-2. Casa María Huamaní	26.02.2005	N-6	24.20	400.0	7.260	296.88	1.0184	7.422	53.90
	27.02.2005	N-7	23.90	520.0	7.170	297.26	1.0193	7.326	70.98
	28.02.2005	N-17	23.90	570.0	7.170	297.04	1.0202	7.338	77.68
	01.03.2005	N-13	24.00	620.0	7.200	296.44	1.0201	7.383	83.97
E-3. EMAPISCO	02.03.2005	N-8	20.40	400.0	6.120	295.56	1.0232	6.314	63.36
	03.03.2005	N-9	23.70	410.0	7.110	295.16	1.0239	7.350	55.78
	04.03.2005	N-10	27.70	360.0	8.310	295.68	1.0256	8.589	41.91
	05.03.2005	N-11	20.70	430.0	6.210	296.80	1.0260	6.398	67.21
E-5. SENATI	11.03.2005	N-18	25.40	580.0	7.620	297.52	1.0184	7.773	74.62
	12.03.2005	N-19	23.40	650.0	7.020	296.71	1.0177	7.175	90.59
	13.03.2005	N-20	28.20	490.0	8.460	295.98	1.0175	8.667	56.54
	14.03.2005	N-21	22.40	440.0	6.720	296.44	1.0172	6.871	64.03
E-6. Hosp. San Juan de Dios	15.03.2005	N-22	23.40	410.0	7.020	296.24	1.0207	7.208	56.88
	16.03.2005	N-23	20.60	420.0	6.180	296.50	1.0214	6.344	66.20
	17.03.2005	N-24	24.00	1030.0	7.200	296.67	1.0214	7.387	139.43
	18.03.2005	N-25	23.80	400.0	7.140	295.88	1.0216	7.347	54.45
E-7. Frente C.S. Esperanza	19.03.2005	N-26	22.50	550.0	6.750	295.40	1.0183	6.934	79.32
	20.03.2005	N-27	23.90	420.0	7.170	295.36	1.0177	7.362	57.05
	21.03.2005	N-28	22.00	520.0	6.600	295.41	1.0175	6.774	76.76

PUNTO DE MUESTREO	FECHA	FILTRO N°	TIEMPO (h)	PESO (μg)	V_{act} (m^3) ^a	T($^{\circ}\text{K}$) ^b	P_{act} (atm) ^b	V_{std} (m^3) ^c	[PM ₁₀] ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
E-8. Dr. Casas (Odontólogo)	23.03.2005	N-29	23.80	510.0	7.140	296.27	1.0175	7.307	69.80
	24.03.2005	N-30	22.90	380.0	6.870	295.59	1.0179	7.050	53.90
	25.03.2005	N-31	23.50	270.0	7.050	295.39	1.0232	7.277	37.10
	26.03.2005	N-32	22.10	250.0	6.630	295.67	1.0226	6.833	36.59
	27.03.2005	N-33	21.20	370.0	6.360	296.13	1.0219	6.540	56.57
	28.03.2005	N-34	24.80	290.0	7.440	296.37	1.0217	7.644	37.94
	29.03.2005	N-35	22.10	580.0	6.630	296.47	1.0205	6.801	85.28
E-9. Casa Elías Zaravia	30.03.2005	N-36	29.00	660.0	8.700	297.01	1.0209	8.912	74.06
	31.03.2005	N-37	22.30	610.0	6.690	296.82	1.0204	6.854	89.00
	01.04.2005	N-38	20.80	440.0	6.240	296.13	1.0200	6.405	68.70
	02.04.2005	N-39	26.80	320.0	8.040	295.48	1.0220	8.287	38.62
E-10. Mun. Paracas	03.04.2005	N-40	20.40	210.0	6.120	295.14	1.0221	6.316	33.25
	04.04.2005	N-41	24.00	320.0	7.200	294.82	1.0214	7.433	43.05
	05.04.2005	N-42	24.00	240.0	7.200	294.69	1.0211	7.434	32.28
	06.04.2005	N-43	23.00	350.0	6.900	294.75	1.0220	7.129	49.09
E-11. APROPISCO	07.04.2005	N-44	23.90	480.0	7.170	294.56	1.0218	7.412	64.76
	08.04.2005	N-45	23.70	500.0	7.110	294.31	1.0214	7.353	68.00
	09.04.2005	N-46	24.40	410.0	7.320	294.25	1.0214	7.572	54.15
	10.04.2005	N-47	20.50	450.0	6.150	294.35	1.0082	6.277	71.69
E-12. C.S. Sta Cruz	11.04.2005	N-48	23.50	570.0	7.050	294.36	1.0079	7.194	79.23
	12.04.2005	N-49	24.40	560.0	7.320	294.30	1.0077	7.469	74.97
	13.04.2005	N-50	24.00	620.0	7.200	294.18	1.0074	7.348	84.38
	14.04.2005	N-51	23.40	690.0	7.020	293.96	1.0192	7.253	95.13
E-13. C.S. San Andrés	15.04.2005	N-52	23.70	610.0	7.110	294.02	1.0194	7.346	83.04
	16.04.2005	N-53	22.90	570.0	6.870	294.09	1.0209	7.107	80.20

PUNTO DE MUESTREO	FECHA	FILTRO N°	TIEMPO (h)	PESO (μg)	V_{act} (m^3) ^a	T($^{\circ}\text{K}$) ^b	P_{act} (atm) ^b	V_{std} (m^3) ^c	[PM ₁₀] ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
E-14. Mun. Túpac.Amaru	17.04.2005	N-54	25.40	540.0	7.620	293.82	1.0224	7.902	68.34
	18.04.2005	N-55	23.70	640.0	7.110	293.70	1.0120	7.301	87.66
	19.04.2005	N-56	23.90	620.0	7.170	293.10	1.0125	7.381	84.00
	20.04.2005	N-57	24.00	720.0	7.200	292.31	1.0133	7.437	96.81
	21.04.2005	N-58	24.00	720.0	7.200	292.75	1.0124	7.420	97.03
E-15. Ref. P.S. San Miguel	22.04.2005	N-59	24.00	780.0	7.200	293.01	1.0130	7.418	105.15
	23.04.2005	N-60	23.90	780.0	7.170	293.81	1.0142	7.376	105.75
	24.04.2005	N-61	27.20	550.0	8.160	296.29	1.0153	8.332	66.01
	25.04.2005	N-62	21.60	530.0	6.480	296.20	1.0150	6.617	80.10
E-16. Mun. San Clemente	04.05.2005	N-63	22.40	720.0	6.720	292.53	1.0158	6.954	103.54
	05.05.2005	N-64	23.70	860.0	7.110	292.44	1.0148	7.352	116.97
	06.05.2005	N-65	23.90	1450.0	7.170	292.27	1.0134	7.409	195.71
	07.05.2005	N-66	22.00	810.0	6.600	291.57	1.0131	6.834	118.52
E-17. C.S. San Clemente	08.05.2005	N-67	25.70	500.0	7.710	291.93	1.0145	7.985	62.62
	09.05.2005	N-68	24.10	550.0	7.230	291.93	1.0138	7.483	73.50
	10.05.2005	N-69	24.00	710.0	7.200	291.15	1.0115	7.454	95.25
	11.05.2005	N-70	24.00	790.0	7.200	290.76	1.0108	7.459	105.92
E-1. Hotel Regency	23.08.2005	N-81	23.90	490.0	7.170	289.73	1.0235	7.548	64.92
	24.08.2005	N-82	23.10	390.0	6.930	290.09	1.0237	7.288	53.52
	25.08.2005	N-83	23.50	380.0	7.050	289.93	1.0240	7.420	51.21
	26.08.2005	N-84	22.80	390.0	6.840	290.29	1.0238	7.189	54.25
	27.08.2005	N-86	26.20	620.0	7.860	289.76	1.0224	8.264	75.02
E-3. EMAPISCO	28.08.2005	N-87	17.30	310.0	5.190	289.32	1.0250	5.479	56.58
	29.08.2005	N-88	24.00	440.0	7.200	290.15	1.0264	7.590	57.97
	30.08.2005	N-89	18.20	210.0	5.460	290.19	1.0270	5.758	36.47

PUNTO DE MUESTREO	FECHA	FILTRO N°	TIEMPO (h)	PESO (μg)	V _{act} (m)	T(°K)	P _{act} (atm)	V _{std} (m ^c)	[PM ₁₀] ($\mu\text{g}/\text{m}$)
	31.08.2005	N-90	14.90	710.0	4.470	290.12	1.0260	4.711	150.72
	01.09.2005	N-91	12.00	430.0	3.600	290.60	1.0248	3.783	113.66
	01.09.2005	N-92	24.60	410.0	7.380	290.52	1.0255	7.763	52.82
E-5. SENATI	03.09.2005	N-93	15.20	370.0	4.560	289.81	1.0207	4.786	77.31
	04.09.2005	N-94	22.60	450.0	6.780	290.12	1.0207	7.109	63.30
	05.09.2005	N-95	15.40	200.0	4.620	290.36	1.0208	4.840	41.32
	07.09.2005	N-96	24.10	440.0	7.230	289.83	1.0191	7.576	58.08
E-4. Colegio Santo Domingo	08.09.2005	N-97	15.20	230.0	4.560	290.22	1.0246	4.797	47.94
	09.09.2005	N-98	44.80	6870.0	13.440	290.47	1.0252	14.137	485.97
	11.09.2005	N-99	15.10	250.0	4.530	290.73	1.0249	4.759	52.53
	12.09.2005	N-100	24.30	510.0	7.290	290.10	1.0271	7.691	66.31
E-9. Casa Elías Zaravia	29.11.2005	N-398	23.80	680.0	7.140	292.21	1.0225	7.445	90.85
	30.11.2005	N-399	24.50	1190.0	7.350	291.93	1.0223	7.670	154.69
	01.12.2005	N-400	25.20	820.0	7.560	291.95	1.0221	7.887	103.97
	02.12.2005	N-401	23.30	1000.0	6.990	292.01	1.0222	7.292	137.14
E-8. Dr. Casas (Odontólogo)	04.12.2005	N-402	25.10	430.0	7.530	292.19	1.0259	7.879	54.58
	05.12.2005	N-403	23.60	390.0	7.080	291.62	1.0250	7.416	52.59
	06.12.2005	N-404	23.40	390.0	7.020	291.61	1.0240	7.346	53.09
	07.12.2005	N-405	24.50	390.0	7.350	292.21	1.0234	7.671	50.84
	08.12.2005	N-406	26.70	440.0	8.010	292.66	1.0233	8.346	52.72
E-2. Casa María Huamani	20.12.2005	N-407	24.00	410.0	7.200	294.67	1.0222	7.443	55.08
	22.12.2005	N-408	27.40	600.0	8.220	294.74	1.0223	8.496	70.62
	23.12.2005	N-409	22.60	450.0	6.780	295.44	1.0219	6.989	64.39
	24.12.2005	N-410	26.60	480.0	7.980	295.93	1.0217	8.210	58.46
	25.12.2005	N-389	13.70	170.0	4.110	295.62	1.0218	4.233	40.16

PUNTO DE MUESTREO	FECHA	FILTRO N°	TIEMPO (h)	PESO (μg)	V_{act} (m^3) ^a	T($^{\circ}\text{K}$)	P_{act} (atm)	V_{std} (m^3) ^c	[PM_{10}] ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
E-7. Frente C.S. Esperanza	02.01.2006	N-390	24.80	300.0	7.440	295.07	1.0196	7.661	39.16
	03.01.2006	N-391	22.50	340.0	6.750	295.57	1.0199	6.941	48.99
	04.01.2006	N-392	23.50	350.0	7.050	295.98	1.0195	7.237	48.36
	05.01.2006	N-393	25.70	270.0	7.710	296.25	1.0195	7.907	34.15
E-6. Hosp. San Juan de Dios	10.01.2006	N-394	22.30	440.0	6.690	295.95	1.0222	6.886	63.90
	11.01.2006	N-395	23.40	440.0	7.020	296.08	1.0209	7.213	61.00
	12.01.2006	N-396	25.60	420.0	7.680	295.75	1.0198	7.892	53.22
	13.01.2006	N-397	3.40	430.0	1.020	295.70	1.0191	1.048	410.47

^a Volumen calculado en base a un flujo de 5 litros/minuto.

^b Temperatura y presión atmosférica calculada en base a los datos medidos en la estación meteorológica SPSO 846910 (Aeropuerto de Pisco) de acuerdo a la información de www.tutiempo.net y www.meteored.com.

^c Volumen estandarizado para las condiciones de presión y temperatura mostradas según lo indicado en 5.6.10.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis estadístico se desarrolló en base a los resultados mostrados en el capítulo anterior (tabla 5.2.), correspondientes a la concentración de PM_{10} , corregidos para las condiciones de presión y temperatura. Dichos valores corresponden al promedio de concentración en periodos de muestreo entre 3.4 y 44.8 horas, dependiendo de las condiciones de acceso al equipo de muestreo.

Los valores de concentración de PM_{10} (Tabla 6.1) oscilaron entre los 29.73 y 485.96 $\mu g/m^3$, con un promedio de 77.21 $\mu g/m^3$, una mediana de 64.57 $\mu g/m^3$, una desviación típica de 59.02 $\mu g/m^3$, y un coeficiente de variación de 76.44% (lo que indica que la muestra contiene datos altamente dispersos). Esta alta variabilidad es concordante con lo indicado en estudios sobre la distribución de PM_{10} en otras ciudades del mundo (Mok y Hoi, 2001).

La distribución de la muestra es asimétrica a la derecha (presencia de valores extremos hacia la derecha de la curva), con el 5% de los valores por encima de los 140 $\mu g/m^3$. Esta alta variabilidad indica que su distribución es *no normal*¹, por lo cual el análisis estadístico alternó el uso de *pruebas estadísticas no paramétricas* para la comprobación de hipótesis y estimaciones, las cuales, para *distribuciones no normales*, son más eficientes que sus correspondientes paramétricas² (Walpole y Myers, 1992; García et al, 2003)

Con respecto a los valores de concentración de PM_{10} consignados en el Reglamento de Estándares de Calidad de Aire, de las 106 muestras comprendidas en la recolección de datos, el 81% de son mayores a

¹ Se refiere a la distribución continua de probabilidad denominada *normal*, que sigue una distribución gaussiana (siguiendo la forma de la *campana de Gauss*), en base a las cuales se desarrollan los *métodos estadísticos paramétricos* para la estimación de hipótesis.

² La diferencia entre la eficiencia de ambos tipos de pruebas radica en que las paramétricas son basadas en la presunción de la normalidad de la muestra y su cálculo gira alrededor del promedio y desviación estándar que, en el caso particular del presente estudio, están altamente influenciados por la existencia de valores extremos.

50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 5 de ellas superan los 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para confirmar estos resultados y extrapolarlos a un periodo anual (al cual se encuentra referida la norma) los datos fueron sometidos a las hipótesis estadísticas correspondientes.

Tabla 6.1. Parámetros estadísticos descriptivos de la concentración de PM₁₀ en el área de estudio.

Parámetro	Valor ^a
Mínimo	29.73
Mediana	64.57
Media (\bar{x})	77.21
Máximo	485.96
Desviación típica (s)	59.02
Asimetría	5.06
Curtosis	30.64

Nota: Los valores mostrados fueron calculados usando el software SPSS 12.0 para Windows.

^a Según el parámetro, las unidades que corresponden son, para el mínimo, mediana, media, máximo y desviación típica, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; para los demás, adimensionales.

6.1. CUMPLIMIENTO DEL REGLAMENTO ESTANDARES NACIONALES DE CALIDAD AMBIENTAL DEL AIRE

El Reglamento de Estándares de Calidad de Aire (DS. N° 074-2011 PCM) indica dos estándares de calidad ambiental para la concentración de PM₁₀ en el aire ambiental. El primero corresponde al promedio anual, el cual no debe exceder los 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; mientras que el segundo corresponde a los promedios diarios que, en el transcurso de un año, no debe exceder en más de 3 días los 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

6.2.1. Promedio Aritmético Anual = 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

El planteamiento contempla la hipótesis nula (H_0) en que el promedio (μ) es igual a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con respecto a una hipótesis alternativa (H_1) donde la media anual sobrepasa lo establecido en la norma.

Hipótesis: $H_0: \mu=50\mu\text{g}/\text{m}^3$ (no excede los Estándares Nacionales).

$H_1: \mu>50\mu\text{g}/\text{m}^3$ (excede los Estándares Nacionales).

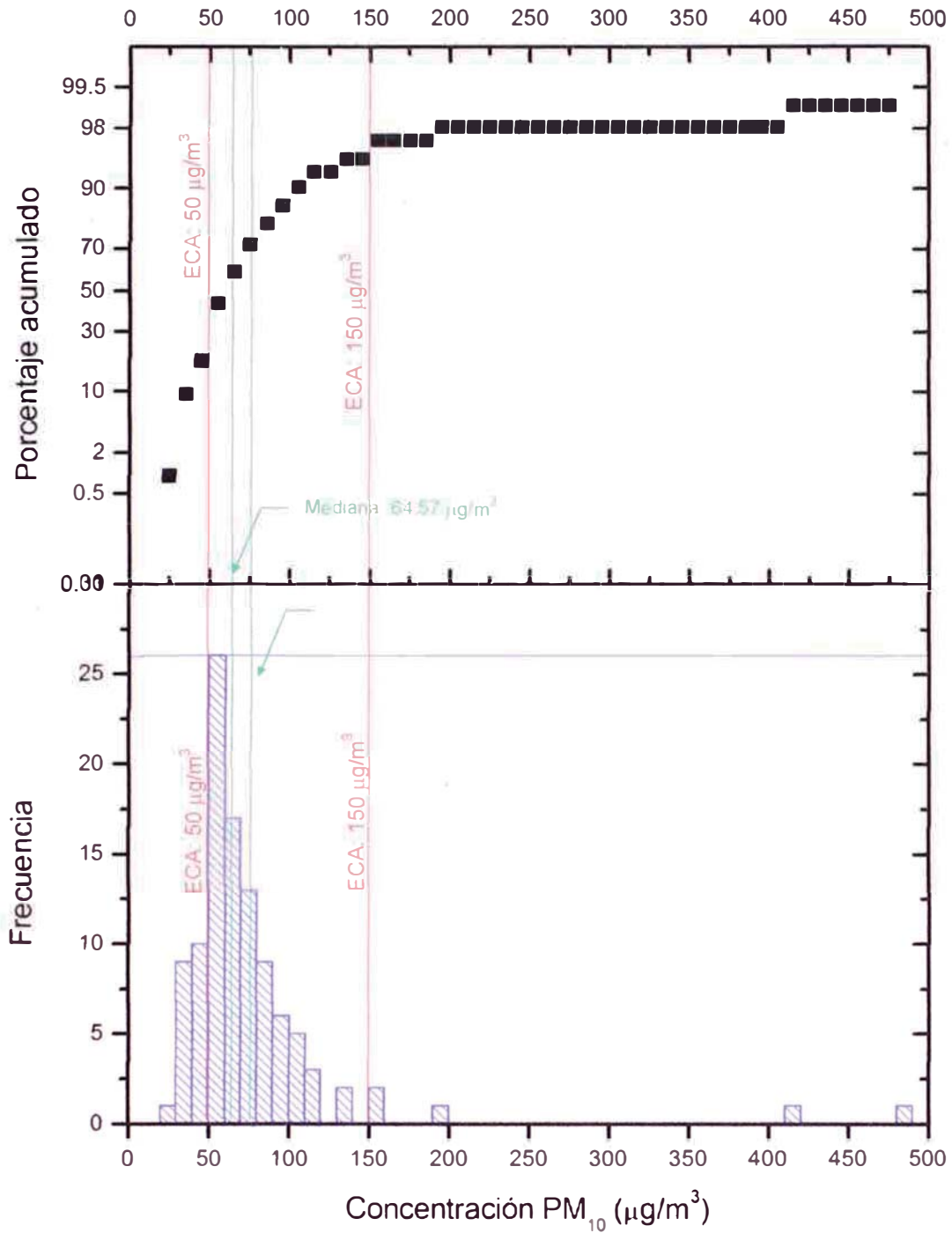


Figura 6.1. Histograma de frecuencias y probabilidades acumuladas correspondientes a las muestras de concentración de PM₁₀ (µg/m³) en la zona

Para la comprobación de hipótesis se desarrollaron las pruebas paramétricas *Z* y *T-student* (dado que $N=106>30$), estas pruebas tienen un grado de validez aceptable), y no paramétrica de rangos con signo de Wilcoxon (a manera de comprobación). Para determinar el rango de variación de la concentración de PM_{10} promedio en la zona en estudio, se estimo el intervalo al 99% de confianza usando la distribución estadística *Z*.

Tabla 6.2. Resultados de prueba *T-student* y *Z* y estimación del intervalo de confianza para el promedio de concentración de PM_{10} ($\mu g/m^3$)

Valor de prueba = $50 \mu g/m^3$					
Prueba	Estadístico	gl	Significancia (bilateral)	Intervalo de confianza	
				Inferior	Superior
<i>Z</i>	$Z= 4.747$	--	0.000	62.175	92.253
<i>T-student</i>	$T= 4.747$	105	0.000		

Nota: Los valores mostrados fueron calculados usando el software SPSS 12.0 y Origin Pro 7.5 para Windows.

Tabla 6.3. Resultados de la prueba de rango con signo de Wilcoxon.

	N	w+	w-	μ_{w+}	σ_{w+}	Z^a
Concentración PM_{10} ($\mu g/m^3$)	106	5001	670	2835.5	317.27	6.82

Nota: Los valores mostrados fueron calculados en base a las relaciones planteadas por Walpole y Myers para la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon.

^a Estadístico *Z* correspondiente a la aproximación normal de la prueba Wilcoxon para muestras grandes.

Los resultados obtenidos en las tres pruebas³ (Tablas 6.2. y 6.3.) indican que la concentración promedio de PM_{10} en la zona de estudio sobrepasa el Estándar de Calidad Ambiental referido al promedio anual. Al 99% de confianza, la concentración promedio es significativamente mayor a $50 \mu g/m^3$ (según las pruebas se confirma esto con una confianza mayor al 99.9%). Al mismo nivel de confianza, el intervalo estimado para la

³ Para el caso de la comprobación de hipótesis al nivel de la muestra en general, ambas pruebas (paramétricas y no paramétricas) concluyen en el mismo resultado.

concentración de PM₁₀ indica que se excede entre 12.2 y 42.3 µg/m³ (34 y 84% respectivamente) el promedio aritmético anual indicado en la norma (50µg/m³).

6.2.2. Promedio 24 Horas (NE⁴ más de 3 veces/año) = 150µg/m³

La simple observación de los valores obtenidos indica 5 muestras superiores a los 150µg/m³, lo que otorga certeza de que la zona de estudio supera el ECA definido en la norma. La prueba de hipótesis corresponde a calcular la probabilidad (grado de confianza) de que se exceda en más de tres días los 150µg/m³ indicados como promedio diario. La comprobación se hizo mediante la prueba estadística no paramétrica binomial.

Hipótesis: H₀: p ≥ 0.990 (362 días o más en un año).

H₁: p < 0.990 (361 días o menos en un año).

La hipótesis planteada (H₀) implica que la proporción de días (p) con concentración de PM₁₀ < 150 µg/m³ es mayor de 0.990⁵, contra una hipótesis alternativa (H₁) donde p es menor a 0.990 (equivalente al cumplimiento e incumplimiento de la norma respectivamente).

Tabla 6.4.

Resultados de la prueba estadística binomial para la proporción de días con PM₁₀ > 150 µg/m³.

	Categoría	N	p observada	p de prueba	Significancia (unilateral)
Concentración PM ₁₀ (µg/m ³)	Grupo 1: ≤ 150µg/m ³	101	0.953	0.990	0.004 ^(a,b)
	Grupo 2: >150µg/m ³	5	.047		
	Total	106	1.000		

Nota: Los valores mostrados fueron calculados utilizando el software SPSS 12.0 para Windows.

^a La hipótesis alternativa establece que la proporción de casos del primer grupo sea < .990.

^b Basado en la aproximación de la distribución normal (Z).

⁴ NE: No debe excederse.

⁵ Valor de contraste asumido, intermedio entre los valores correspondientes a 3 y 4 días al año.

Los resultados de la prueba binomial (Tabla 6.4.) confirman lo observado en el análisis del muestreo, es decir que dada la distribución de la muestra, el ECA es excedido con una confianza superior al 99.5%, según indica la significancia obtenida.

6.3. CALIDAD DE AIRE EN LA CIUDAD DE PISCO Y ALREDEDORES

Las estaciones de muestreo utilizadas en la investigación corresponden a 9 puntos al interior del casco urbano de la capital del distrito de Pisco (ciudad de Pisco) y las 8 restantes en 4 distritos vecinos (Túpac Amaru, San Andrés, San Clemente y Paracas). Dentro del estudio se analizó la existencia de diferencias estadísticas entre las muestras tomadas al interior de la ciudad de Pisco y en sus alrededores.

Hipótesis: $H_0: \mu_1 = \mu_2$ (los promedios de ambas muestras son similares).

$H_1: \mu_1 < \mu_2$ (existen diferencias estadísticamente significativas).

El planteamiento contempla la hipótesis nula (H_0) en que ambos promedios (μ_1 y μ_2) son iguales, es decir, existe similitud entre ambas zonas; con respecto a una hipótesis alternativa (H_1) en la cual se asume la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre ambas zonas, con una diferencia a favor de las estaciones de muestreo ubicadas fuera de la ciudad de Pisco ($\mu_1 < \mu_2$).

Tabla 6.5.

Estadísticos descriptivos de la muestra según la ubicación del punto de muestreo.

	Ubicación del Punto de Muestreo	N	Media	Mediana	Desviación típica
Concentración PM ₁₀ (µg/m ³)	Ciudad de Pisco	74	75.270	57.510	67.711
	Distritos Alrededores ^(a)	32	81.710	80.150	31.169

Nota: Los valores mostrados fueron calculados utilizando el software SPSS 12.0 para Windows.

^a Corresponde a los valores en las estaciones de muestreo ubicadas en los distritos de Túpac Amaru, San Andrés, San Clemente y Paracas

La comprobación de la hipótesis se desarrolló usando las pruebas paramétrica Z, que para el rango de datos ($N > 30$) es equivalente a la prueba T-student (Walpole y Myers, 1992). También se desarrolló la prueba de Levene para igualdad de varianzas.

Tabla 6.6.

Prueba estadística Z y T para la igualdad de medias. Pisco vs. Distritos alrededores.

	Estadístico	gl	Sign. (bilateral)	Diferencia de medias	Intervalo al 99% de confianza	
					Inferior	Superior
<i>Prueba Z</i>	-0.670	--	0.256	-6.441	-31.181	18.300
<i>Prueba T</i>						
Asumiendo						
varianzas	-0.514	104.0	0.304	-6.441	-39.320	26.439
iguales						
Sin asumir						
varianzas	-0.670	103.5	0.257	-6.441	-31.654	18.772
iguales						

Nota: Los valores mostrados fueron calculados utilizando las relaciones indicadas y el software SPSS 12.0 para Windows.

Tabla 6.7.

Prueba de Levene para la igualdad de varianzas.

	Estadístico F	Significancia
Concentración PM_{10} ($\mu g/m^3$)	0.799	0.373

Nota: Los valores mostrados fueron calculados utilizando el software SPSS 12.0 para Windows.

Los resultados de las pruebas Z, T-student y de Levene (Tablas 6.6 y 6.7) no permiten afirmar la existencia de diferencias entre los promedios y varianzas de las concentraciones de PM_{10} entre las zonas de estudio al nivel de confianza deseado.

Aunque el análisis gráfico de la distribución de ambos grupos indica que las muestras en el distrito de Pisco son menores (Figura 6.2), la existencia de *valores pico* en esta zona influyen en su promedio, desvirtuando la afirmación de diferencias significativas. Debido a esta alta dispersión de valores, y a la *no normalidad* de las poblaciones se desarrollaron pruebas no paramétricas de Kruskal Wallis para la comprobación de diferencia de medias⁶.

Tabla 6.8.

Rangos correspondientes a la prueba de Kruskal-Wallis.

Ubicación del Punto de Muestreo		N	Rango promedio
Concentración PM ₁₀ (µg/m ³)	Ciudad	73	47.51
	Alrededores	32	67.34
	Total	105	

Nota: Los valores mostrados fueron calculados utilizando el software SPSS 12.0 para Windows.

Tabla 6.9.

Estadísticos de contraste correspondientes a la prueba de Kruskal-Wallis.^(a)

	Valor
Chi-cuadrado (χ^2)	9.294
gl	1
Significancia asintótica	0.002

Nota: Los valores mostrados fueron calculados utilizando el software SPSS 12.0 para Windows.

Los resultados de esta prueba (Tabla 6.9) comprueban el análisis gráfico llevando a la conclusión que la concentración promedio de PM₁₀ es significativamente menor en la ciudad de Pisco con respecto a los distritos alrededores ($\chi^2=9.294 > \chi^2_{\text{critico al 99\% de confianza}}=6.635$).

⁶ Los promedios aritméticos, usados en las pruebas *Z* y *T-student* han sido influenciados por valores altos de concentración de PM₁₀ hallados en el distrito de Pisco.

Las diferencias obtenidas entre los resultados de las pruebas paramétricas y no paramétricas hacen evidente la influencia de los valores extremos en la distribución de la calidad de aire en la zona de estudio, motivo por el cual se analizará más adelante la correlación entre dichos valores y otros factores meteorológicos o antropogénicos en la zona de estudio.

6.3.1. Promedio Aritmético Anual = 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Los valores de concentración de PM₁₀, diferenciados según la ubicación del punto de muestreo (ciudad de Pisco y distritos alrededores) fueron sometidos a la prueba estadística T-student (paramétrica) y prueba de los rangos con signo de Wilcoxon (no paramétrica) para determinar si cumplen con los ECAs señalados en Reglamento de Estándares de Calidad de Aire o si el problema se centra en alguna de ellas en particular⁷.

Tabla 6.10.

Resultados de la prueba T-student. Media aritmética de la concentración de PM₁₀ según la ubicación del punto de muestreo.

Valor de prueba = 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$					
	Estadístico	gl	Significancia (bilateral)	Intervalo de confianza	
				Inferior	Superior
Ciudad de Pisco	3.210	73	0.002	4.451	46.088
Distritos Alrededores	5.755	31	0.000	16.591	46.830

Nota: Los valores mostrados fueron calculados con el software SPSS 12.0 para Windows, en base a las relaciones planteadas anteriormente.

Tabla 6.11.

Parámetros estadísticos de la prueba de rango con signo de Wilcoxon.

	N	w+	w-	μ_{W+}	σ_{W+}	Z ^a
Ciudad de Pisco	74	2343	342	1387.50	185.62	5.147
Distritos Alrededores	32	503	25	264.00	53.48	4.469

⁷ Los valores estadísticos descriptivos de ambas muestras que se usaron en la comprobación de hipótesis se indican en la tabla 6.5, con $t_{\text{critico}} > 2.326$ y $\chi^2_{\text{critico}} = 6.635$ para un 99% de confianza

Nota: Los valores mostrados fueron calculados en base a las relaciones planteadas por Walpole y Myers para la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon.

^a Aproximación Z de la prueba Wilcoxon para muestras grandes.

Según los resultados (Tabla 6.10 y Tabla 6.11) los promedios en ambas zonas son mayores que el ECA. Para la ciudad de Pisco este es superior en $25.97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (52%) y para los otros distritos en $31.711 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (63%), comprobándose nuevamente que la concentración de PM_{10} tiende a ser mayor fuera del distrito de Pisco.

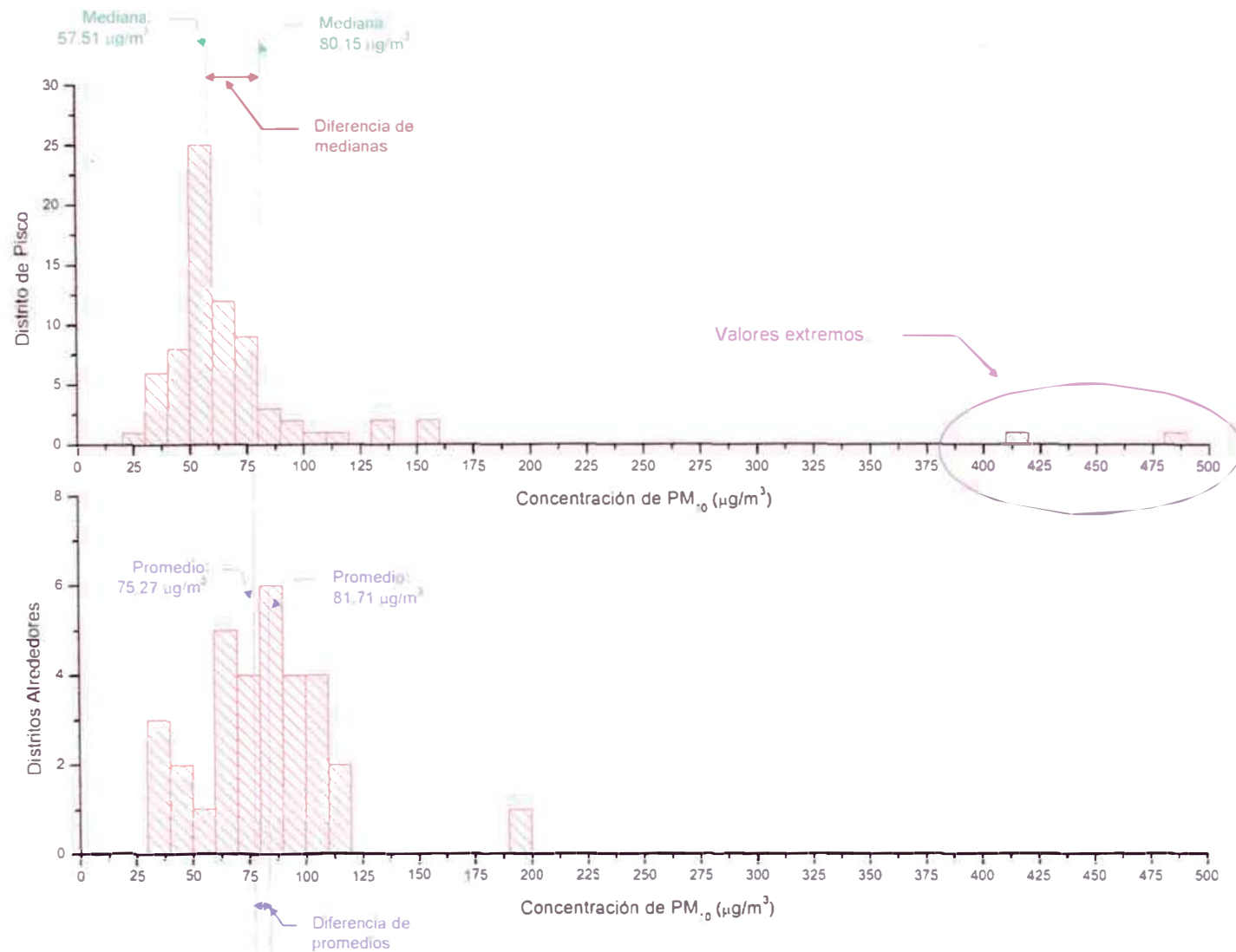


Figura 6.2. Comparación de histogramas para la concentración promedio de PM₁₀ (µg/m³) de las muestras obtenidas en la ciudad de Pisco v los distritos alrededores.

6.3.2. Promedio 24 Horas (NE más de 3 veces/año) = 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Se plantearon hipótesis análogas a las usadas en 6.1.2 y fueron probadas con la prueba no paramétrica binomial para determinar si, habiendo dividido la zona de estudio, la condición persiste o sólo corresponde a una de ellas.

Tabla 6.12.

Prueba estadística binomial. Proporción de días con $\text{PM}_{10} > 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ según la ubicación de la estación de muestreo.

	Categoría	N	p observada	p de prueba	Significancia (unilateral)
Ciudad de Pisco	Grupo 1: $\leq 150\mu\text{g}/\text{m}^3$	70	0.946	0.990	0.007 ^(a,b)
	Grupo 2: $>150\mu\text{g}/\text{m}^3$	4	.054		
	Total	74	1.000		
Distritos Alrededores	Grupo 1: $\leq 150\mu\text{g}/\text{m}^3$	31	0.969	0.990	0.0275 ^(a,b)
	Grupo 2: $>150\mu\text{g}/\text{m}^3$	1	.031		
	Total	32	1.000		

Nota: Los valores mostrados fueron calculados utilizando el software SPSS 12.0 para Windows.

^a La hipótesis alternativa establece que la proporción de casos del primer grupo sea $< .989$.

^b Basado en la aproximación de la distribución normal (Z).

Los resultados obtenidos (Tabla 6.12) indican que en la ciudad de Pisco persiste la condición de exceder los valores normados, es decir, en el transcurso de un año se exceden en más de 3 días los $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} en el aire. Por otro lado, la evidencia estadística indica, a un nivel de confianza menor (97%) que a las afueras del distrito de Pisco esta condición también se repite.

6.4. DISTRIBUCION ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN DE PM₁₀ EN LA ZONA DE ESTUDIO

6.4.1. Homogenización De Datos Por Estación De Muestreo

La estadística descriptiva de la concentración de PM₁₀ para cada estación de muestreo (Tabla 6.13) evidencia la existencia de valores extremos que escapan de la distribución de los demás valores en dicho punto (Gráfico 6.2.). Presumiendo que los valores extremos se deben a circunstancias que no sólo abarcan las características de la estación de muestreo en que se registraron, y serían distorsionantes al momento de las comparaciones punto a punto, se discriminaron aquellos que se encontraban fuera de los límites marcados por el intervalo $X \pm 4 \cdot S^8$ (media y desviación típica de los valores restantes). La naturaleza de dichos resultados será analizada más adelante.

Según dicho análisis se identificaron 6 muestras (Tabla 6.14) en las estaciones de EMAPISCO (2), Colegio Santo Domingo (1), Hospital San Juan de Dios (2) y Municipalidad San Clemente (1) cuyos valores fueron separados antes de desarrollar las curvas isoconcentración y el análisis de variabilidad de PM₁₀ en la zona de estudio.

⁸ Intervalo recomendado por la Lic. Beatriz Castañeda (docente FIA-UNI) con fecha 29 de enero del 2007.

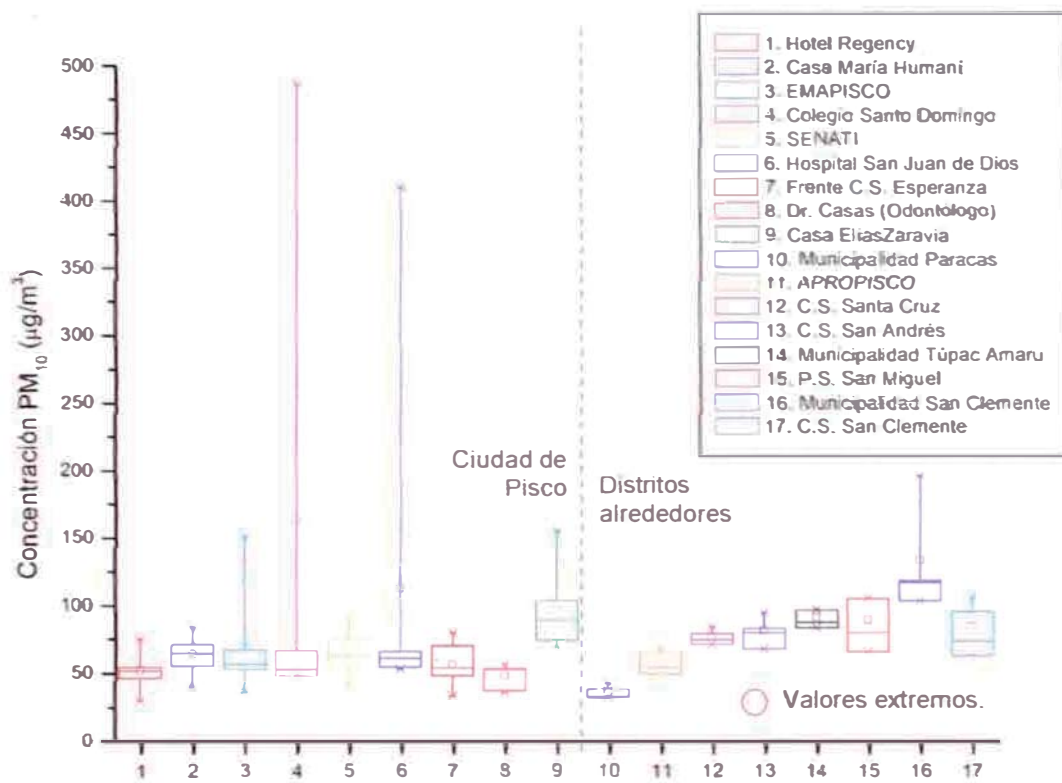


Figura 6.3 Diagrama de cajas. Concentración de PM10 según estación de muestreo en la zona de estudio.

Tabla 6.13. Estadística descriptiva de la concentración de PM10 según estación de muestreo.

Estación de muestreo	Promedio	Desviación estándar	Mín.	P ₂₅	Mediana	P ₇₅	Máx.	Registros
<i>Ciudad de Pisco</i>								
E-1. Hotel Regency	52.24	12.78	29.73	46.32	51.81	54.25	75.02	9
E-8. Odontólogo (Dr. Casas)	48.00	8.25	36.59	37.94	52.59	53.09	56.57	9
E-7. Frente C.S. Esperanza	56.39	15.96	34.15	48.36	53.90	69.80	79.32	9
E-3. EMAPISCO	69.65	35.29	36.47	52.81	57.28	67.21	150.71	10
E-4. Colegio Santo Domingo	163.19	215.32	47.95	47.95	59.42	66.31	485.96	4
E-6. Hospital San Juan de Dios	113.17	123.37	53.22	54.44	62.45	66.20	410.31	8
E-5. SENATI	65.73	15.02	41.32	56.54	63.67	74.62	90.59	8
E-2. Casa María Huamani	63.92	13.51	40.16	55.09	64.39	70.98	83.98	9
E-9. Casa Elías Zaravia	100.58	30.47	68.70	74.06	90.17	103.97	155.15	8
<i>Distritos Alrededores</i>								
E-10. Mun. Paracas	36.80	5.01	32.28	32.28	35.93	38.61	43.05	4
E-11. APROPISCO	59.00	8.86	49.10	49.10	59.46	64.76	68.00	4
E-12. C.S. Santa Cruz	77.57	5.49	71.69	71.69	77.11	79.23	84.38	4
E-13. C.S. San Andrés	81.68	11.00	68.34	68.34	81.62	83.04	95.13	4
E-14. Mun. Túpac Amaru	91.38	6.58	84.00	84.00	92.24	96.81	97.04	4
E-15. P.S. San Miguel	89.25	19.57	66.01	66.01	92.63	105.15	105.75	4
E-16. Mun. San Clemente	133.69	41.89	103.54	103.54	117.75	118.53	195.71	4
CE-17. .S. San Clemente	84.32	19.78	62.62	62.62	84.38	95.25	105.91	4

Nota: Los valores mostrados fueron calculados utilizando el software Origin Pro 7.5 para Windows

Tabla 6.14.

Muestras discriminadas por exceder la distribución de las estaciones de muestreo.

Estación	PM ₁₀ (µg/m ³)	Fecha	Filtro	Promedio ^a (\bar{x})	Desviación Est. ^a (S)	$\bar{x} + 4 \cdot S$
E-3.	150.71	31/08/05	90	54.010	10.298	95.204
EMAPISCO	113.67	01/09/05	91			
E-4. Col. Santo	485.96	09/09/05	98	55.597	12.056	62.173
E-6. Hosp. San	139.43	17/03/05	24	59.273	5.255	80.295
Juan de Dios	410.31	13/01/06	397			
E-16. Mun. San Clemente	195.71	06/05/05	65	113.013	8.241	145.978

Nota: Los valores mostrados fueron calculados utilizando el software Origin Pro 7.5 para Windows.

^a Media y desviación estándar referidos al conjunto de datos restantes en la estación de muestreo analizada.

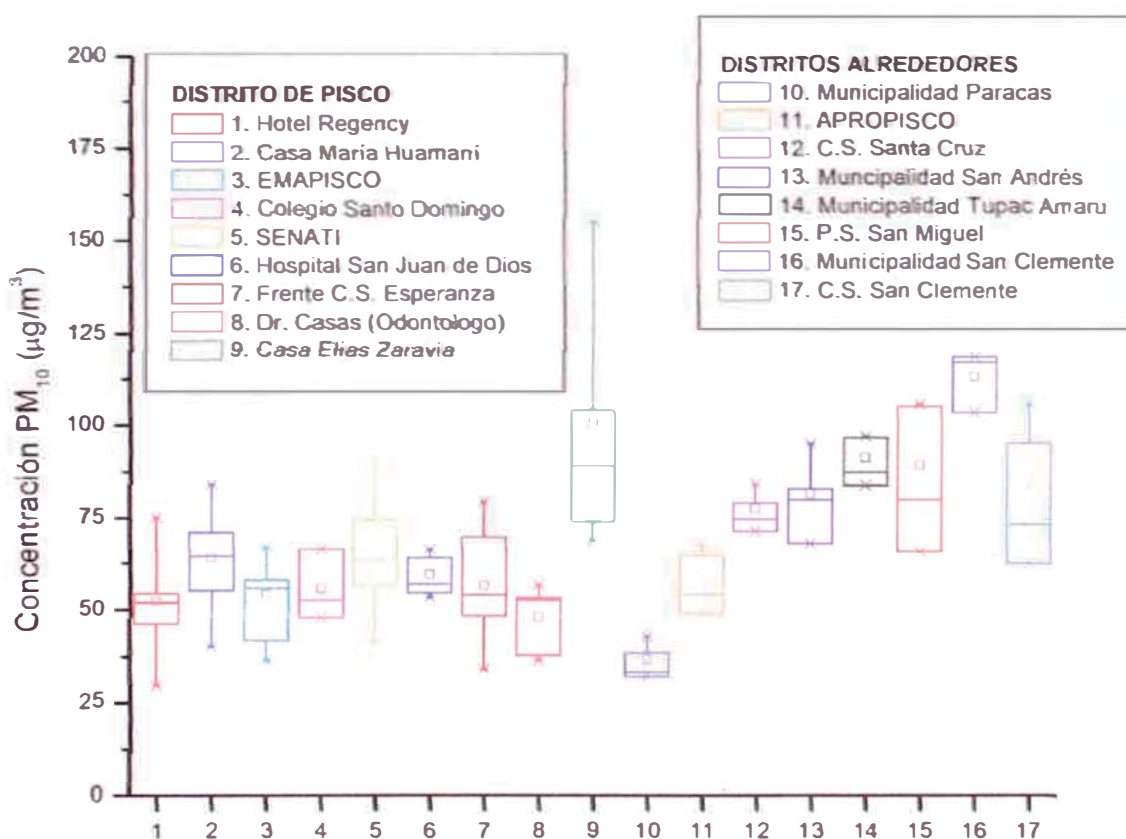


Figura 6.4 Diagrama de cajas. Concentración de PM₁₀ según estación de muestreo para los valores no discriminados.

Tabla 6.15. Estadísticos descriptivos no discriminados según estación de muestreo ^a.

Estación de muestreo	Promedio	Mediana	Desviación estándar	Número de registros
<i>Ciudad de Pisco</i>				
E-8. Odontólogo (Dr. Casas)	48.00	52.59	8.25	9
E-1. Hotel Regency	52.24	51.81	12.78	9
E-4. Colegio Santo Domingo	55.60	52.53	9.56	3
E-7. Frente C.S. Esperanza	56.39	53.90	15.96	9
E-3. EMAPISCO	54.01	56.18	10.30	8
E-6. Hospital San Juan de Dios	59.27	58.94	5.26	6
E-2. Casa María Huamani	63.92	64.39	13.51	9
E-5. SENATI	65.73	63.67	15.02	8
E-9. Casa Elías Zaravia	100.58	90.17	30.47	8
<i>Pisco Alrededores</i>				
E-10- Mun. Paracas.	36.80	32.28	5.01	4
E-11. APROPISCO.	59.00	49.10	8.86	4
E-12. C.S. Santa Cruz.	77.57	71.69	5.49	4
E-13. C.S. San Andrés	81.68	68.34	11.00	4
E-14. Mun. Túpac Amaru	91.38	84.00	6.58	4
E-15. Ref. P.S. San Miguel	89.25	66.01	19.57	4
E-16. Mun. San Clemente	113.01	116.97	8.24	4
E-17. C.S. San Clemente	84.32	62.62	19.78	4

Nota: Los valores mostrados fueron calculados utilizando el software Origin Pro 7.5 para Windows.

^a Referido a los valores restantes luego del proceso de discriminación de valores extremos.

Los valores restantes muestran una tendencia más homogénea dentro de cada estación de muestreo (Figura 6.4), pudiendo apreciarse mejor el comportamiento de la concentración de PM_{10} en cada una de ellas y usar el promedio de los valores restantes como representativos de cada punto.

En base a la concentración promedio (Tabla 6.15) en cada estación se han desarrollado las curvas isoconcentraciones, en torno a las cuales se basa el análisis de la distribución de la concentración de PM_{10} en el área de estudio, a continuación mostrado.

6.4.2. Distribución de La Concentración de PM_{10} en el Area de Estudio

Las curvas isoconcentraciones, elaboradas en base a la información obtenida en las estaciones de muestreo (Figura 6.5.), indican una tendencia un aumento de la concentración de PM_{10} en el sentido de la dirección predominante del viento en la zona de estudio, la cual es proveniente del sur oeste especialmente en aquellas localidades ubicadas cerca al litoral (CONAM, 2004). La dirección del viento es, en este caso, el factor determinante para la variación de la concentración de PM_{10} , siendo el agente responsable del movimiento de partículas dentro del área de estudio, las mismas que han sido detectadas en las muestras analizadas.

La distribución de áreas según la concentración de PM_{10} a la cual se encuentran expuestas, (Tabla 6.16.) indica que sólo el 11% del área estudiada se encuentra por debajo de los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (promedio anual indicado en la norma), mientras que la tercera parte del área de estudio se encuentra expuesta entre 50 y $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (88% del área total). Finalmente, menos del 1% soportan concentraciones de PM_{10} superior a los $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabla 6.16. Distribución de áreas según concentración de PM_{10} a que se encuentran expuestas.

Concentración de PM_{10}	Área (km^2)	% del área total
< 40 $\mu g/m^3$	0.971	0.65
40 – 50 $\mu g/m^3$	15.670	10.43
50 – 60 $\mu g/m^3$	34.568	23.00
60 – 70 $\mu g/m^3$	34.347	22.86
70 – 80 $\mu g/m^3$	38.685	25.74
80 – 90 $\mu g/m^3$	24.658	16.41
90 – 100 $\mu g/m^3$	1.228	0.82
100 – 110 $\mu g/m^3$	0.122	0.08
> 110 $\mu g/m^3$	0.015	0.01
Total	150.263	100.00

Sin embargo, la mayor proporción del área comprendida en la elaboración de las curvas isoconcentración corresponden a zonas no urbanizadas, que corresponden a terrenos de cultivo, en los alrededores del área urbana, o áreas desérticas (Figura 6.6), donde no existe población expuesta a los contaminantes antes analizados y que por otro lado serían la fuente de material particulado que constituyen las muestras tomadas en otras estaciones, especialmente aquellas ubicadas más alejadas hacia el este.

A nivel de la franja costera, el viento que proviene del Océano Pacífico contiene una cantidad menor de PM_{10} , lo cual se refleja en una zona de menor concentración cerca de la bahía de Paracas (E-10).

Municipalidad Paracas). Cuando estos vientos siguen a través del continente, arrastran una mayor cantidad de partículas hacia la parte este de la cuenca atmosférica, dentro de la extensión del área de análisis. Otros estudios realizados en zonas donde se presentan alternadamente vientos provenientes del mar y de placas continentales, indican que la concentración de PM_{10} es siempre menor cuando estos provienen de las masas de agua (Van Der Zee et. al., 1998; Rodríguez et. Al., 2002; Mok y Hoi, 2005), similar a lo observado en la zona costera del área de estudio.

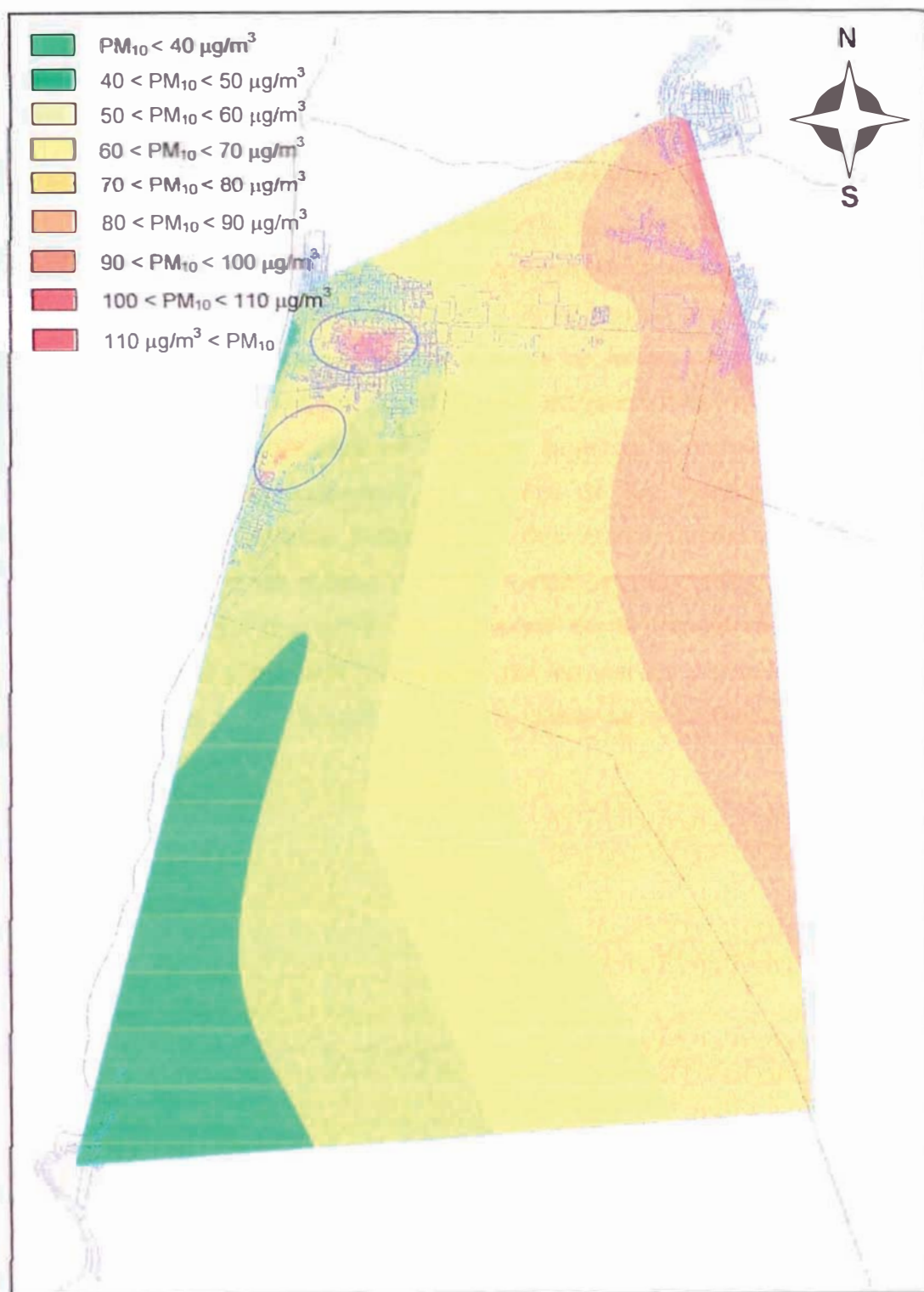


Figura 6.5. Distribución de la concentración de PM_{10} en el área de estudio.
Nota: Los óvalos indican zonas de discontinuidad en la tendencia dentro de la cuenca atmosférica

Dentro del área de estudio, especialmente el tramo ubicado entre Pisco e Ica, el terreno es predominantemente desértico y su cobertura está formada por tres tipos de depósitos eólicos: 1) el primero, constituido por arenas de grano grueso de alto contenido de ferromagnesianos, actualmente es estático o poco movable, 2) el segundo, conformado por mantos de arena fina y clara compuesta mayormente por cuarzo, presenta una movilidad mayor, y 3) el tercero correspondiente a la deposición eólica que se observa en las faldas de los cerros de las estribaciones andinas, proviene de la franja costera y es movilizado por los vientos existentes en la zona, llegando a desplazarse grandes distancias especialmente por acción de los vientos denominados “Paracas” (CONAM, 2006). Estos dos últimos depósitos, compuestos mayormente de cuarzo y arcilla, serían los principales constituyentes del material particulado responsable de la concentración de PM₁₀ analizada y que son arrastrados por los vientos provenientes del mar hacia las zonas ubicadas al este de la cuenca atmosférica.

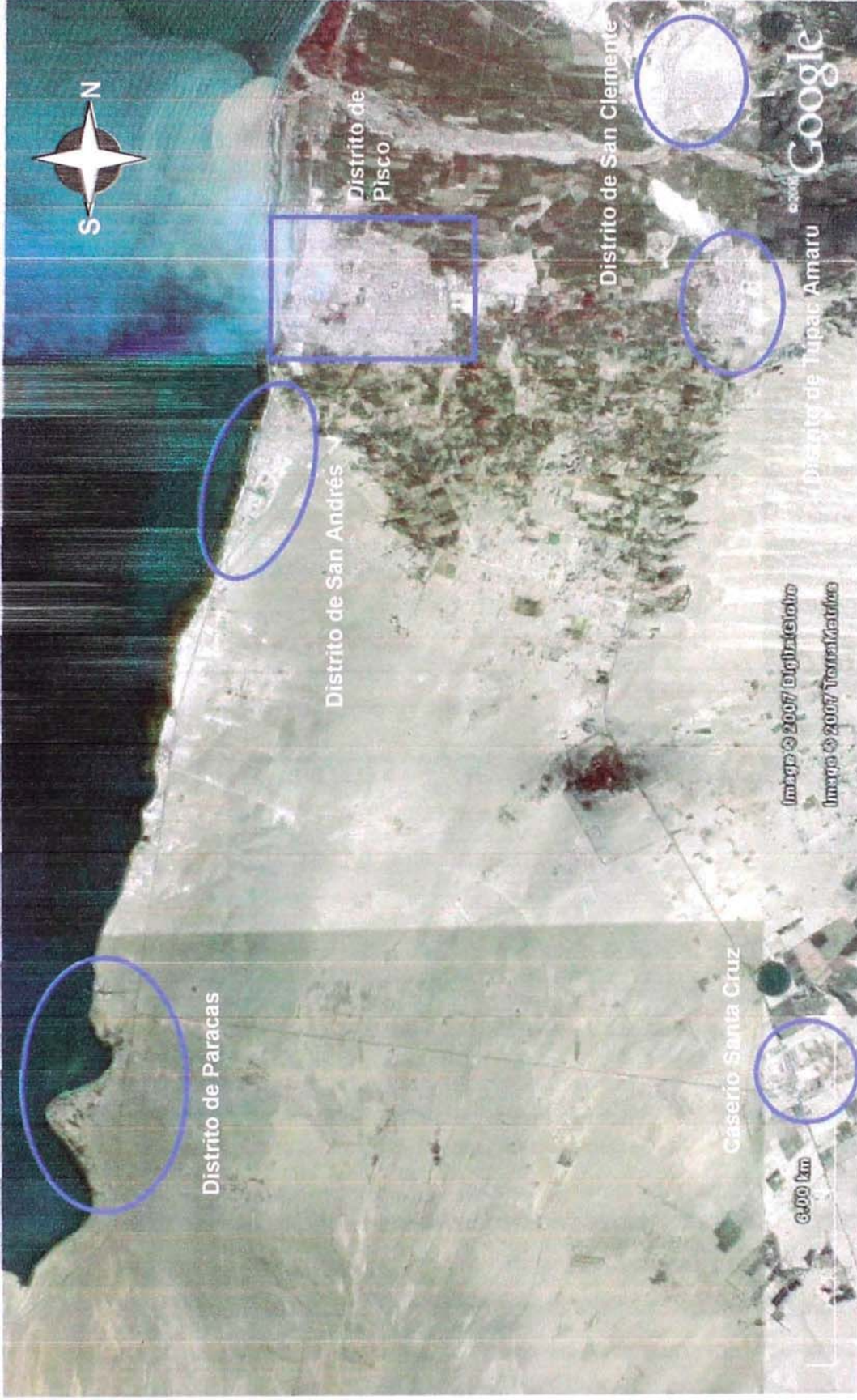


Figura 6.6. Vista satelital del área de estudio. Fuente: Google Earth v.4.0.2693 beta.

Nota: Las regiones dentro de las líneas indican el área urbanizada que cubre una menor proporción con respecto a los terrenos desérticos y de cultivo.

6.4.3. Concentración de PM₁₀ en Zonas Urbanizadas dentro del Area de Estudio

Dentro del área de estudio se distinguen 5 áreas urbanizadas: Pisco, San Clemente, San Andrés, Túpac Amaru y Paracas (en orden según el número de habitantes); así como pequeños caseríos como Santa Cruz, el más alejado, que se encuentra representado por una estación de muestreo (Figura 6.6.). Dadas las características de las estaciones, ubicadas en zonas residenciales y comerciales dentro del área urbana, los resultados de la concentración de PM₁₀ por distrito nos indican el nivel de contaminación a la que se encuentra expuesta la población existente en el área de estudio. Según los valores muestreados, el área urbana con menor concentración se encuentra en el distrito de Paracas, seguida por Pisco, San Andrés, Santa Cruz (centro poblado), Túpac Amaru y San Clemente.

Tabla 6.17.

Concentración de PM₁₀ promedio según áreas urbanizadas.

Distrito	Promedio	Mediana	Desviación estándar	Número de registros
Paracas	36.800	35.932	5.012	4
Pisco	61.882	56.578	21.047	69
San Andrés	70.339	68.168	15.247	8
Túpac Amaru	90.314	92.236	13.563	8
San Clemente	96.617	103.538	21.295	7
Santa Cruz ^(a)	77.569	77.105	5.489	4

Nota: Los valores mostrados fueron calculados utilizando el software Origin Pro 7.5 para Windows.

^(a) Centro poblado perteneciente al distrito de Paracas. Se tomó de manera separada por estar ubicado a una distancia de 12 km de la capital de dicho distrito.

La diferencia existente entre las concentraciones de PM₁₀ en cada una de las zonas urbanizadas en el área de estudio, según las pruebas estadísticas de Mann-Whitney y Kruskal-Wallis (Tabla 6.18), indican que la zona urbana del distrito de Paracas presenta los menores valores (concentración promedio de 36.80 µg/m³), seguida por el distrito de San Andrés, Pisco, Túpac Amaru, San Clemente y Santa Cruz (centro poblado).

Tabla 6.18.

Pruebas estadísticas no paramétricas para la comparación de PM₁₀ según distritos.

Distrito	Distrito de prueba	Mann-Whitney			Kruskal-Wallis		Z
		U _{prueba}	U _{crítico} ^a	Sign. ^b	h _{prueba}	h _{crítico} ^a	
Paracas	Pisco	18		0.001	8.461		-2.909
	San Andrés	0		0.002	7.385		-2.717
	Túpac Amaru	0		0.002	7.385		-2.717
	San Clemente	0		0.003	7.000		-2.646
	C.P. Santa Cruz	0		0.015	5.333		-2.309
Pisco	San Andrés	176		0.048	2.787		-1.669
	Túpac Amaru	53		0.000	13.860		-3.723
	San Clemente	55		0.001	11.223		-3.350
	C.P. Santa Cruz	44		0.010	5.191		-2.278
San Andrés	Túpac Amaru	10		0.011	5.338		-2.310
	San Clemente	9		0.015	4.835		-2.199
	C.P. Santa Cruz	10		0.184	1.038		-1.019
San Clemente	Túpac Amaru	21		0.232	0.656		-0.810
	C.P. Santa Cruz	7		0.115	1.750		-1.323
Túpac Amaru	C.P. Santa Cruz	6		0.055	2.885		-1.698

Nota: Los valores mostrados fueron calculados utilizando el software SPSS 12.0 para Windows.

^a Los valores críticos corresponden para $\alpha=0.01$, equivalente al 99% de confianza.

^b Significancia unilateral (Sign. Bilateral/2) correspondiente a la hipótesis $H_0: \mu_1=\mu_2$, $H_1: \mu_1<\mu_2$

Según los resultados de las pruebas estadísticas, existen diferencias significativas entre la calidad del aire en la zona urbana del distrito de Paracas con respecto a las otras áreas urbanas. Por otro lado, las pruebas estadísticas indican cierta similitud entre el distrito de Pisco y San Andrés, y en menor grado entre este último y el C.P. Santa Cruz. Finalmente, las muestras tomadas en los distritos de San Clemente y Túpac Amaru muestran una similitud más acentuada (Figura 6.7).

Dentro de la tendencia global, analizada al nivel de toda el área de estudio, el orden en el cual se dan las concentraciones para cada una de las zonas urbanizadas responde a la distribución del PM_{10} originada por el arrastre de partículas desde los terrenos descubiertos, predominantes en la cuenca atmosférica de Pisco, con zonas de discontinuidad debido a fuentes específicas, según se analiza a continuación.

6.4.4. Zonas Especiales de Concentración de PM_{10}

Cómo se mencionó, la tendencia de distribución de PM_{10} en el área de estudio presenta dos zonas de discontinuidad (Figura 6.5) en las cuales existe un incremento característico cuyo origen se correlacionan con fuentes, puntuales o de área, generadoras de dicho contaminante.

6.4.4.1. **Ciudad de Pisco.** Para el análisis de la variación en la concentración de PM_{10} en las estaciones dentro de la ciudad de Pisco, estas fueron

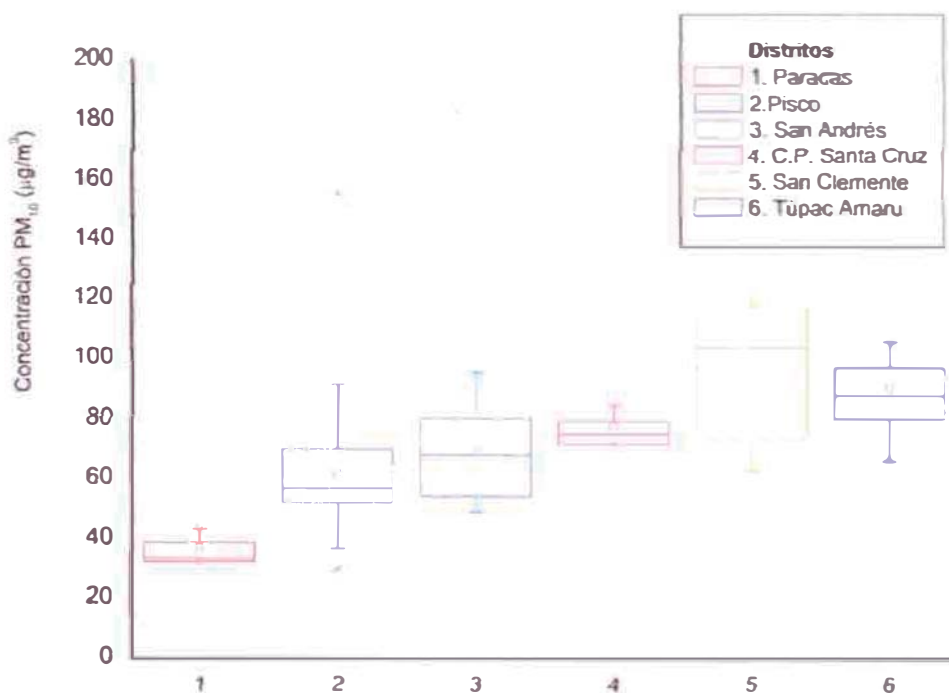


Fig. 6.7. Diagrama de cajas de concentración de PM_{10} según distritos.

ordenadas en función a las diferencias estadísticas entre estas y una estación de referencia mediante las pruebas no paramétricas de Mann-

Whitney y Kruskal-Wallis⁹ (Tabla 6.19). Según dicho análisis, la mayor concentración corresponde a la zona comercial, con niveles superiores a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, alrededor de la estación E-9. Casa Elías Zaravia.

Dentro de la ciudad de Pisco, predominan concentraciones entre 50 y $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en el límite nor-este se tiene entre 60 y $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Finalmente, los menores valores registrados, menores a los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ indicados en los ECA, se encuentran cerca a la línea de costa (Figura 6.8.).

El hecho de que la concentración de PM_{10} sea relativamente menor en el casco urbano que en la periferia del distrito, en especial en el límite nor-este, podría explicarse por el incremento de áreas sin pavimentar en este último sector, a pesar que Pisco constituye el distrito con mayor área pavimentada dentro del área de estudio. La acción de los vientos sobre el terreno expuesto, mayormente terreno de cultivo y áreas libres secas, sería el causante del incremento del material particulado en esta zona.

⁹ Pruebas aplicadas para establecer las diferencias estadísticas entre la concentración para cada punto de muestreo. El orden final de las estaciones responde a la significancia estadística de las diferencias y los valores estadísticos (U de Mann-Witney y h de Kruskal-Wallis).

Tabla 6.19.

Pruebas estadísticas no paramétricas para la comparación de estaciones de muestreo.

Estación base	Estación a prueba	Mann-Whitney			Kruskal-Wallis		Z
		U _{prueba}	U _{crítico} ^a	Sign. ^b	h _{prueba}	h _{crítico} ^a	
E-8. Dr. Casas (Odontólogo)	E-1. Hotel Regency	35	≤14	0.333	0.236	>3.841	-0.486
	E-4. Colegio Santo Domingo	11	≤1	0.364	0.214	>3.841	-0.462
	E-7. Frente C.S. Esperanza	29	≤14	0.170	1.031	>3.841	-1.015
	E-3. EMAPISCO	19	≤11	0.057	2.676	>3.841	-1.636
	E-6. Hosp. San Juan de Dios	4	≤7	0.003	7.347	>3.841	-2.711
	E-2. Casa María Huamani	9	≤14	0.002	7.737	>3.841	-2.782
	E-5. SENATI	7	≤11	0.002	7.787	>3.841	-2.791
	E-9. Casa Elías Zaravia	0	≤11	0.000	12.000	>3.841	-3.463
	E-4. Colegio Santo Domingo	11	≤1	0.364	0.214	>3.841	-0.462
E-1. Hotel Regency	E-7. Frente C.S. Esperanza	34	≤14	0.303	0.329	>3.841	-0.574
	E-3. EMAPISCO	29	≤11	0.271	0.454	>3.841	-0.674
	E-6. Hosp. San Juan de Dios	13	≤7	0.057	2.722	>3.841	-1.650
	E-2. Casa María Huamani	19	≤14	0.032	3.604	>3.841	-1.898
	E-5. SENATI	17	≤11	0.037	3.343	>3.841	-1.828
	E-9. Casa Elías Zaravia	2	≤11	0.000	10.704	>3.841	-3.272

Estación base	Estación a prueba	Mann-Whitney			Kruskal-Wallis		Z
		U _{prueba}	U _{crítico} ^a	Sign. ^b	h _{prueba}	h _{crítico} ^a	
E-4. Colegio Santo Domingo	E-7. Frente C.S. Esperanza	12	≤1	0.432	0.077	>3.841	-0.277
	E-3. EMAPISCO	11	0	0.461	0.042	>3.841	-0.204
	E-6. Hosp., San Juan de Dios	6	0	0.274	0.600	>3.841	-0.775
	E-2. Casa María Huamani	7	≤1	0.141	1.444	>3.841	-1.202
	E-5. SENATI	7	0	0.188	1.042	>3.841	-1.021
	E-9. Casa Elías Zaravia	0	0	0.006	6.000	>3.841	-2.449
E-7. Frente C.S. Esperanza	E-3. EMAPISCO	35	≤11	0.482	0.009	>3.841	-0.096
	E-6. Hosp., San Juan de Dios	22	≤7	0.304	0.347	>3.841	-0.589
	E-2. Casa María Huamani	27	≤14	0.129	1.421	>3.841	-1.192
	E-5. SENATI	23	≤11	0.118	1.565	>3.841	-1.251
	E-9. Casa Elías Zaravia	5	≤11	0.001	8.898	>3.841	-2.983
E-3. EMAPISCO	E-6. Hosp., San Juan de Dios	17	≤8	0.207	0.817	>3.841	-0.904
	E-2. Casa María Huamani	20	≤11	0.070	2.371	>3.841	-1.540
	E-5. SENATI	16	≤10	0.053	2.824	>3.841	-1.680
	E-9. Casa Elías Zaravia	0	≤10	0.000	11.294	>3.841	-3.361
E-6. Hospital San Juan de Dios	E-2. Casa María Huamani	19	≤7	0.194	0.889	>3.841	-0.943
	E-5. SENATI	16	≤6	0.173	1.067	>3.841	-1.033

Estación base	Estación a prueba	Mann-Whitney			Kruskal-Wallis		Z
		U _{prueba}	U _{crítico} ^a	Sign. ^b	h _{prueba}	h _{crítico} ^a	
	E-9. Casa Elías Zaravia	0	≤6	0.001	9.600	>3.841	-3.098
E-2. Casa María Huamani	E-5. SENATI	34	≤11	0.444	0.370	>3.841	-0.192
	E-9. Casa Elías Zaravia	6	≤11	0.001	8.333	>3.841	-2.887
E-5. SENATI	E-9. Casa Elías Zaravia	8	≤10	0.005	6.353	>3.841	2.521

Nota: Los valores mostrados fueron calculados utilizando el software SPSS 12.0 para Windows.

^a Los valores críticos corresponden para $\alpha=0.01$, equivalente al 99% de confianza.

^b Significancia unilateral (Sign. Bilateral/2) correspondiente a la hipótesis $H_0: \mu_1=\mu_2$, $H_1: \mu_1<\mu_2$.

La zona representada por la estación E-9. Casa Elías Zaravia, se caracteriza por tener la más alta actividad comercial dentro del distrito. Frente a la estación antes mencionada se encuentra el mercado de abastos de mayor flujo comercial y afluencia de público que conlleva a



Figura 6.8. (a) Distribución de la concentración de PM₁₀ en el área urbana de la ciudad de Pisco (b) Vista satelital. Fuente: Google Earth v.4.0.2693 beta.

una significativa cantidad de vehículos automotores y el tráfico constante en la vía pública, lo cual fue observado durante las visitas a la zona realizadas durante las campañas de muestreo.

La zona en cuestión se encuentra inscrita en la Red Urbana de

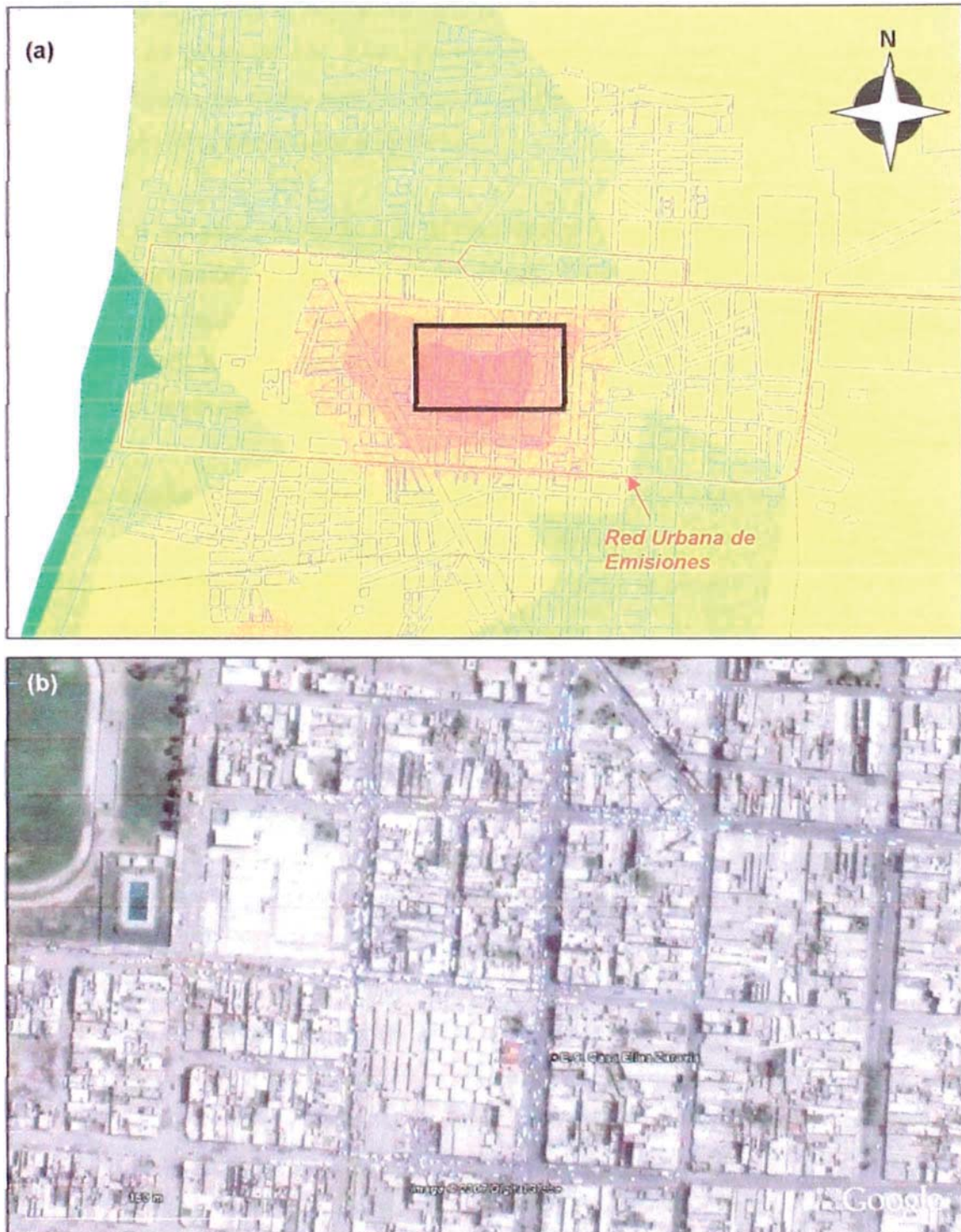


Figura 6.9. (a) Concentración de PM₁₀ en la zona comercial de la ciudad de Pisco (b) Vista de las vías públicas y el tráfico en la zona. Fuente: Google Earth v.4.0.2693 beta.

Emisiones del distrito de Pisco, definida en estudios anteriores, que incluye las principales vías de circulación dentro del distrito (CONAM, 2004). Sin embargo, en contraste con lo analizado en dichos estudios, la mayor circulación y tráfico de vehículos automotores, y por consiguiente la mayor emisión de contaminantes atmosféricos, no se da a lo largo de las vías que conforman esta red sino dentro del área inscrita en estas vías, lo que se confirma con la elevada concentración de PM₁₀ observada (Figura 6.9).

Lo anterior, sumado a la antigüedad y mal mantenimiento del parque automotor en el distrito de Pisco hace de esta zona una fuente importante de emisión de contaminantes (Miranda, 2004; CONAM, 2006), lo que correspondería con los altos niveles de PM₁₀ reportados en el presente estudio.

6.4.4.2. Límite Pisco – San Andrés. Las curvas de isoconcentración (Figura 6.5.) indican una segunda *zona de discontinuidad* con respecto a la tendencia global dentro del área de estudio, la misma que está ubicada entre los distritos de San Andrés y Pisco.

Dicha zona, con valores de PM₁₀ entre 60 y más de 80 µg/m³ se encuentra al nor-este de las empresas pesqueras ubicadas en la franja costera del distrito de San Andrés, las mismas que han sido identificadas como la segunda fuente fija de emisión de partículas totales en suspensión en la cuenca atmosférica de Pisco (Sosa et al., 2002, Fuentes y Guillén, 2003; CONAM, 2004; CONAM, 2006).

Cabe resaltar que en las fechas en las que se desarrolló la recolección de muestras (del 6 al 9 de abril en la estación E-11. APROPISCO y 16 al 19 de abril, E-13. C.S. San Andrés) corresponde a la época de producción de las industrias pesqueras en la zona (Abril a Mayo), por lo que se corresponde con los valores elevados obtenidos. (Klepel Consulting, 2005).

Dada la dirección del viento, proveniente del sur-oeste, las emisiones de material particulado producidas por estas empresas son arrastradas al nor-este del punto de emisión, lo cual se aprecia en los valores registrados en las estaciones de muestreo (E-10. C.S. San Andrés).

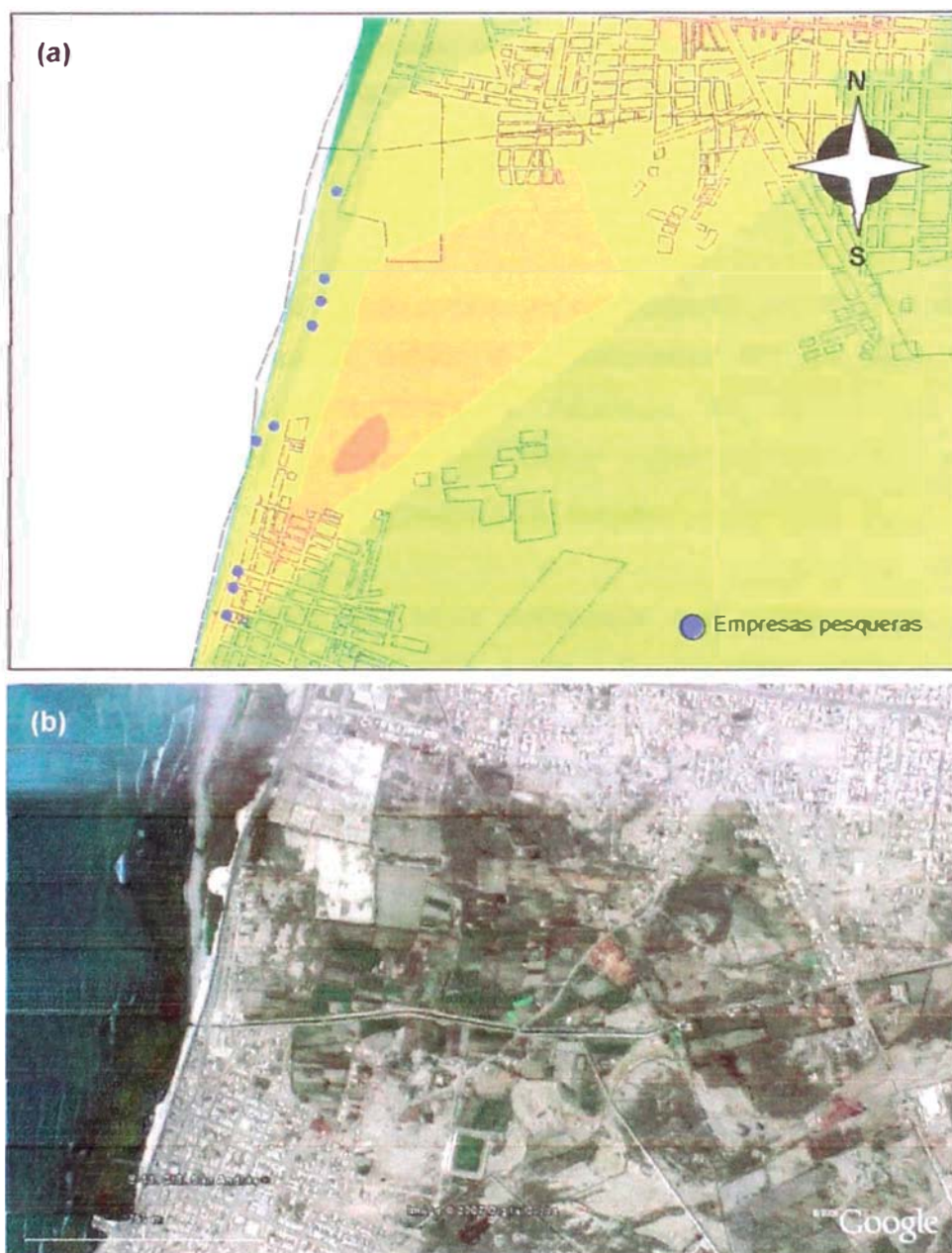


Figura 6.8. (a) Concentración de PM₁₀ la zona norte del distrito de San Andrés. Nótese la ubicación de las empresas pesqueras (b) Vista satelital de la zona. Fuente: Google Earth v.4.0.2693 beta.

6.4.4.3. Otras Fuentes de Generación de PM₁₀. En el ámbito del área de estudio existen, además de las analizadas hasta el momento, otras fuentes generadoras de contaminantes atmosféricos, tal como se ha observado en estudios anteriores sobre la contaminación del aire en la cuenca atmosférica de Pisco, según los cuales se identifican, además de las fuentes que han podido ser identificadas en el presente estudio, plantas procesadoras de flor de Marisol, planta de fraccionamiento GLP e industrias siderúrgicas y fundiciones (Klepel Consulting, 2005; CONAM, 2006).

Sin embargo, estas no han podido ser directamente identificadas en las mediciones realizadas debido a la naturaleza del estudio y a la ubicación de las estaciones de muestreo, las cuales han sido emplazadas exclusivamente en áreas residenciales de las zonas urbanas de los distritos incluidos en el estudio.

Estudios realizados en años anteriores han determinado altas concentraciones de Partículas Totales Suspendidas (PTS) y SO₂. (Klepel Consulting, 2005; CONAM, 2006) en la ubicación de las empresas antes mencionadas, lo cual que podría indicar la existencia de concentraciones elevadas de PM₁₀ en las zonas cercanas a las mismas.

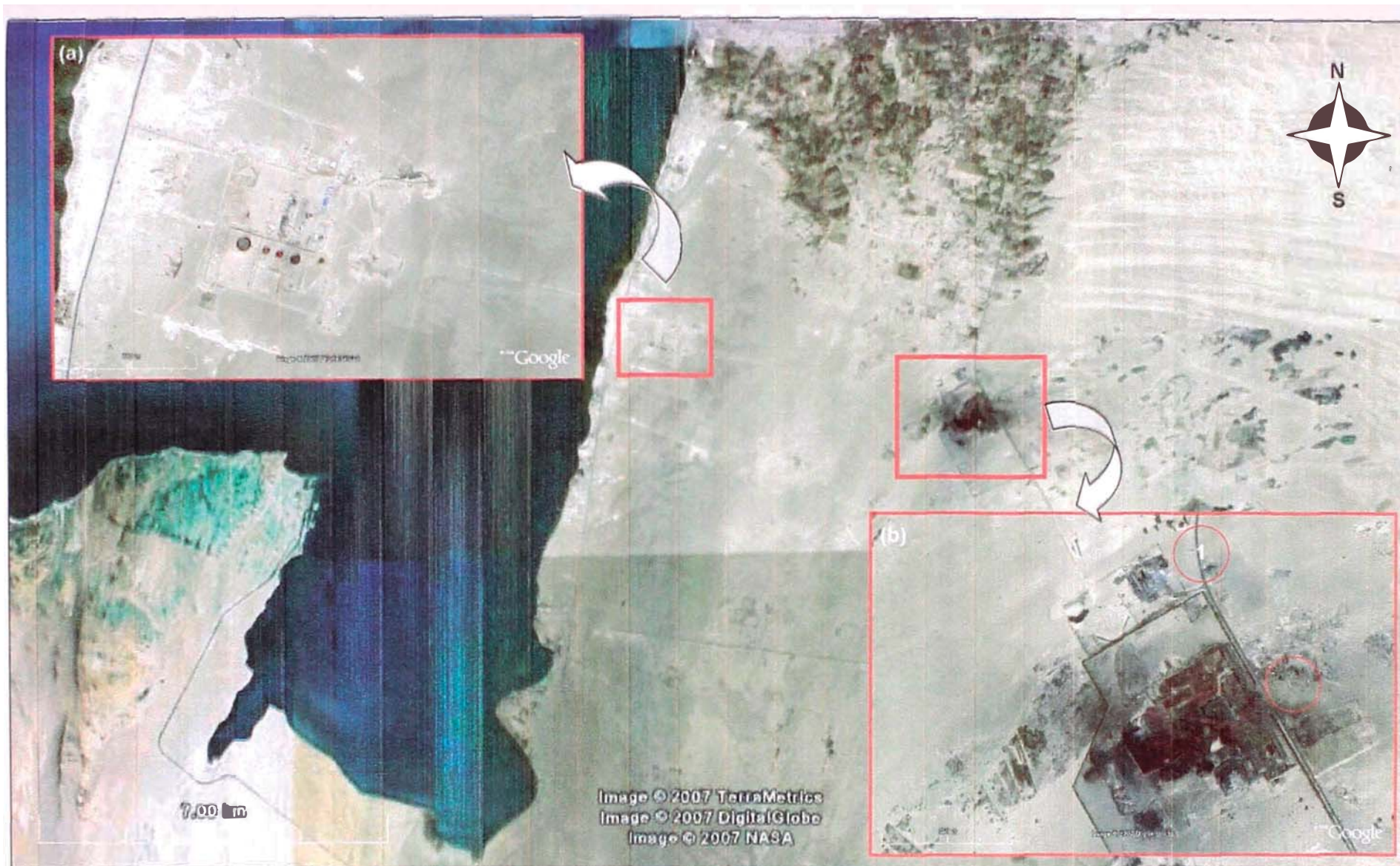


Figura 6.9. Vista satelital de otras fuentes de generación de contaminantes en la zona de estudio. (a) Planta de Fraccionamiento de GLP (Pluspetrol), (b.1) Industrias siderúrgicas (Aceros Arequipa), (b.2.) Fundiciones de estaño (FUNSUR). Fuente: Google Earth v.4.0.2693 beta.

6.4.5. Relaciones entre la Concentración de PM₁₀ y los Parámetros Meteorológicos en la Zona de Estudio

Estudios realizados en años anteriores y distintas ciudades del mundo indican una correlación existente entre la concentración de PM₁₀ y las condiciones meteorológicas de la zona de estudio. Parámetros como la humedad relativa y los vientos, en magnitud y dirección han mostrado afectar en cierta medida la presencia de material particulado en el aire.

6.4.5.1. **Humedad Relativa.** En el caso específico del estudio, los valores de *humedad disponibles corresponden a la estación SPSO 846910* (Aeropuerto de Pisco), ubicada al norte del distrito de San Andrés, para las fechas en las cuales se desarrolló el muestreo.

Dado que la humedad ha sido considerada como una variable interviniente en la relación principal¹⁰, el efecto de dicho parámetro meteorológico en la concentración de PM₁₀ se analizó usando los valores de dispersión entre los valores medidos diariamente y la concentración promedio para cada estación de muestreo en las distintas campañas de muestreo, definida según la siguiente relación.

$$k = \frac{PM_{10}}{\frac{\sum_{i=1}^n PM_{10}}{n}}$$

k: coeficiente de dispersión de PM₁₀.

PM₁₀: Concentración diaria de PM₁₀ medida.

n: número de muestras realizadas en la estación en una campaña de muestreo.

La relación existente varía cuando se analiza la zona urbana (ciudad de Pisco) con respecto a las zonas rurales (distritos alrededores) debido,

¹⁰ La relación principal de estudio, definida en las hipótesis, es la existente entre los valores de concentración de PM₁₀ y la presencia, tipo y ubicación de fuentes generadoras de dicho contaminante.

sobre todo a las distintas fuentes de las cuales este contaminante proviene.

Para el caso de la zona urbana, es decir las estaciones de muestreo ubicados en el distrito de Pisco, la concentración de PM_{10} varía inversamente con la humedad relativa, por lo tanto existe una variación directa con la inversa de dicho parámetro ($1/H.R.$), analizada para la dispersión de valores (parámetro k) antes mencionada (Figuras 6.10. y 6.11.).

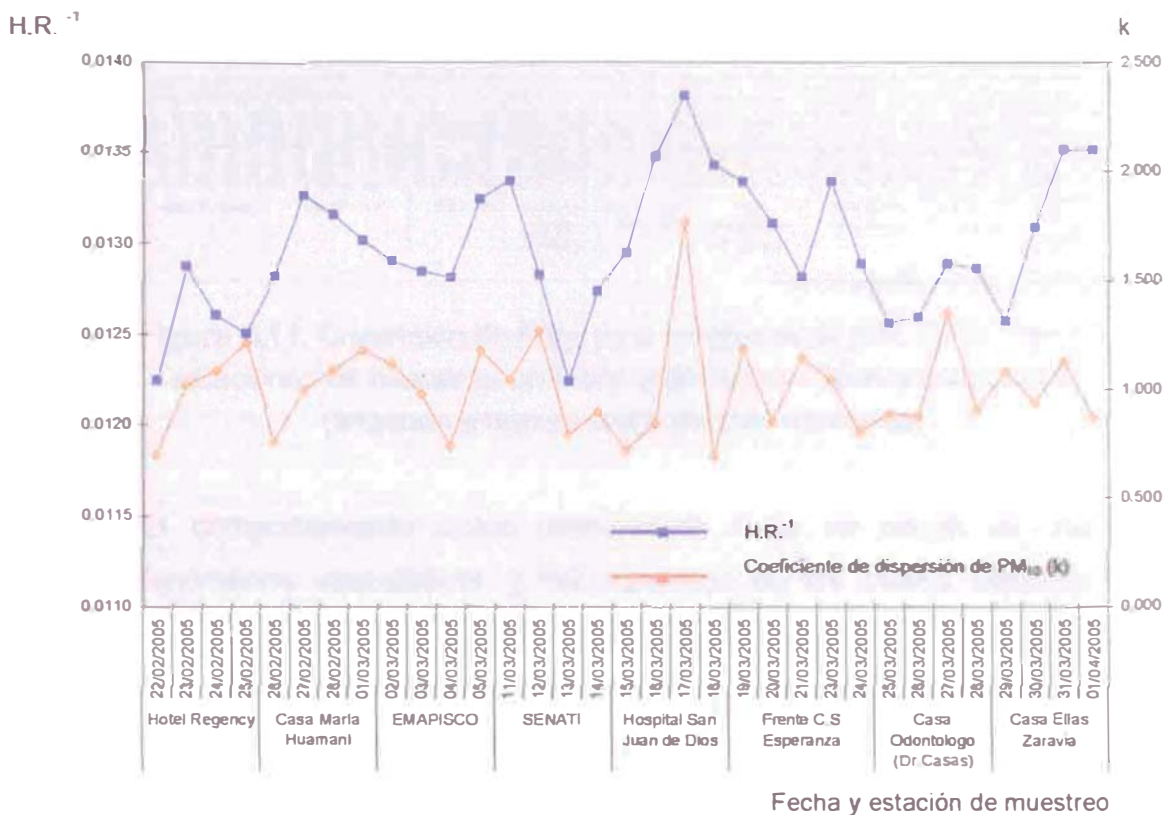


Figura 6.10. Dispersión de PM_{10} (k) e inversa de la H.R. ($H.R.^{-1}$) en las estaciones de muestreo en Pisco entre febrero y abril del 2005 (primera campaña de muestreo)

Esta correlación inversa entre PM_{10} y humedad ha sido demostrada anteriormente en otras zonas urbanas (Mok y Hoi, 2005; Karar et. al., 2006; Johansson et. al, 2006); donde la variación de la humedad relativa se relacionan inversamente con la variación de concentración promedio de PTS y PM_{10} en una serie temporal.

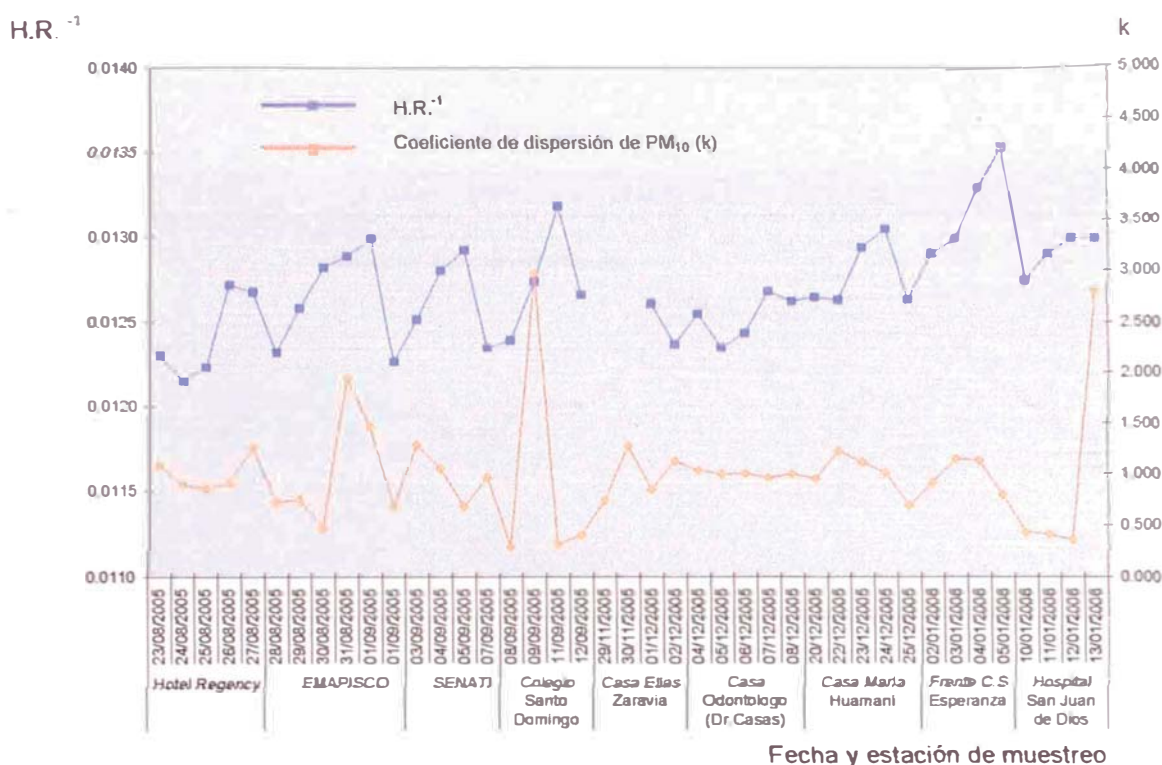


Figura 6.11. Dispersión de PM₁₀ (k) e inversa de la H.R. (H.R.⁻¹) en las estaciones de muestreo en Pisco entre agosto 2006 y enero 2006 (segunda y tercera campañas de muestreo)

El comportamiento antes mencionado tiene su origen en varios fenómenos atmosféricos y fisicoquímicos de los cuales depende la estabilidad del material particulado en el aire así como la generación de partículas ultrafinas que contribuyen a la concentración de PM₁₀ medida en las estaciones de muestreo.

Por otro lado, en las estaciones de muestreo que se ubican en las áreas urbanizadas de los demás distritos, que corresponden a zonas que pueden ser identificadas como rurales, la relación entre concentración de PM₁₀ y humedad relativa es directa, a diferencia de lo analizado anteriormente (Figura 6.12.).

Este cambio de tendencia se podría explicar por la diferencia en las fuentes de contaminación a la que se encuentran expuestas ambas zonas, así como la reducida cantidad de información que se tiene para

cada una de las estaciones utilizadas (en promedio 4 observaciones por cada una).

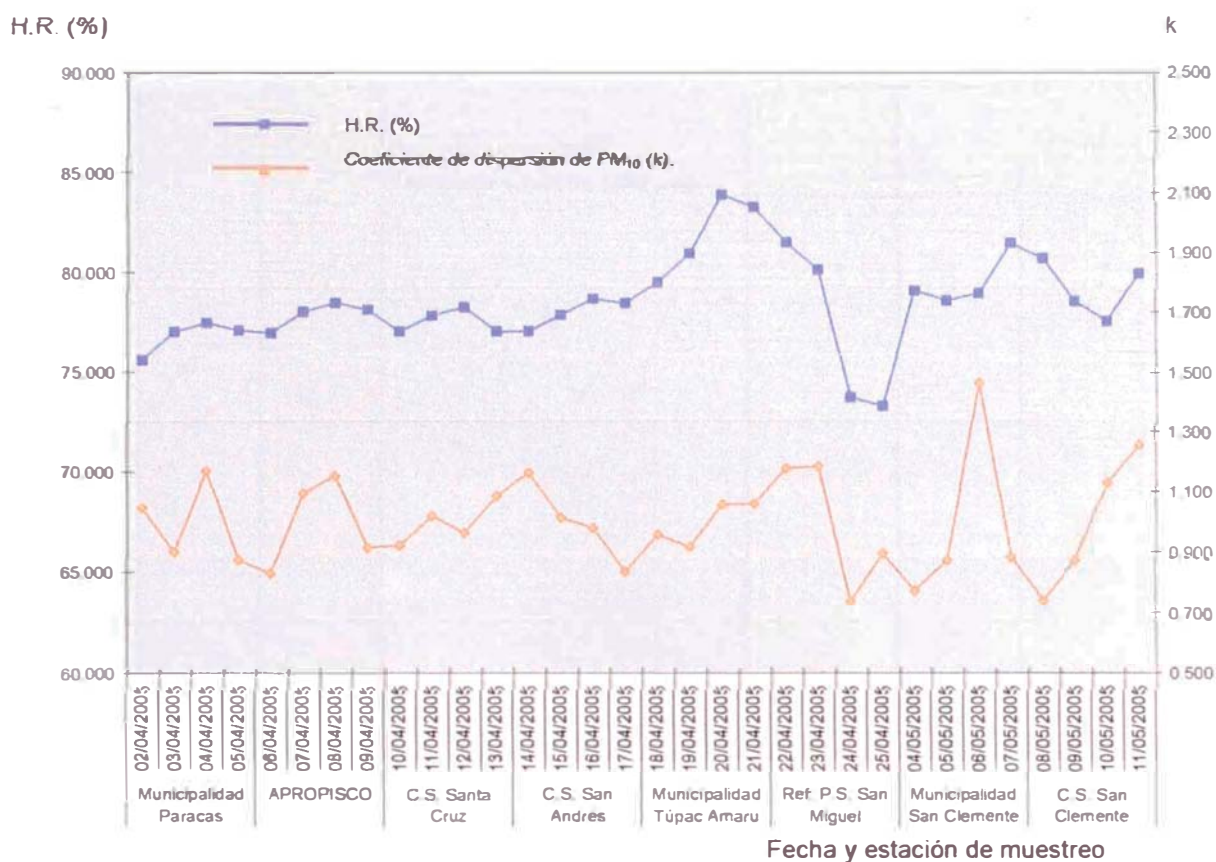


Figura 6.12. Dispersión de PM₁₀ (k) y humedad relativa (%) en las estaciones de muestreo en San Andrés, Paracas, San Clemente y Túpac Amaru entre abril y mayo del 2005 (primera campaña de muestreo).

6.4.5.2. Vientos. El estudio de la correlación entre la concentración de PM₁₀ y la presencia de vientos, tanto en dirección como intensidad, ha identificado que, para zonas urbanas con alta contaminación, los vientos más veloces reducen la presencia del contaminante, dispersándolo fuera del área de mayor concentración, sin embargo cuando las velocidades son demasiado intensas y existen fuentes naturales de generación de PM₁₀, como en el caso de las áreas rurales rodeadas de terrenos expuestos, eriazos y/o desérticos, como en el caso de tormentas de vientos que producen incrementos excepcionales

en la distribución regular de la concentración de PM_{10} en distintas ciudades en el mundo.

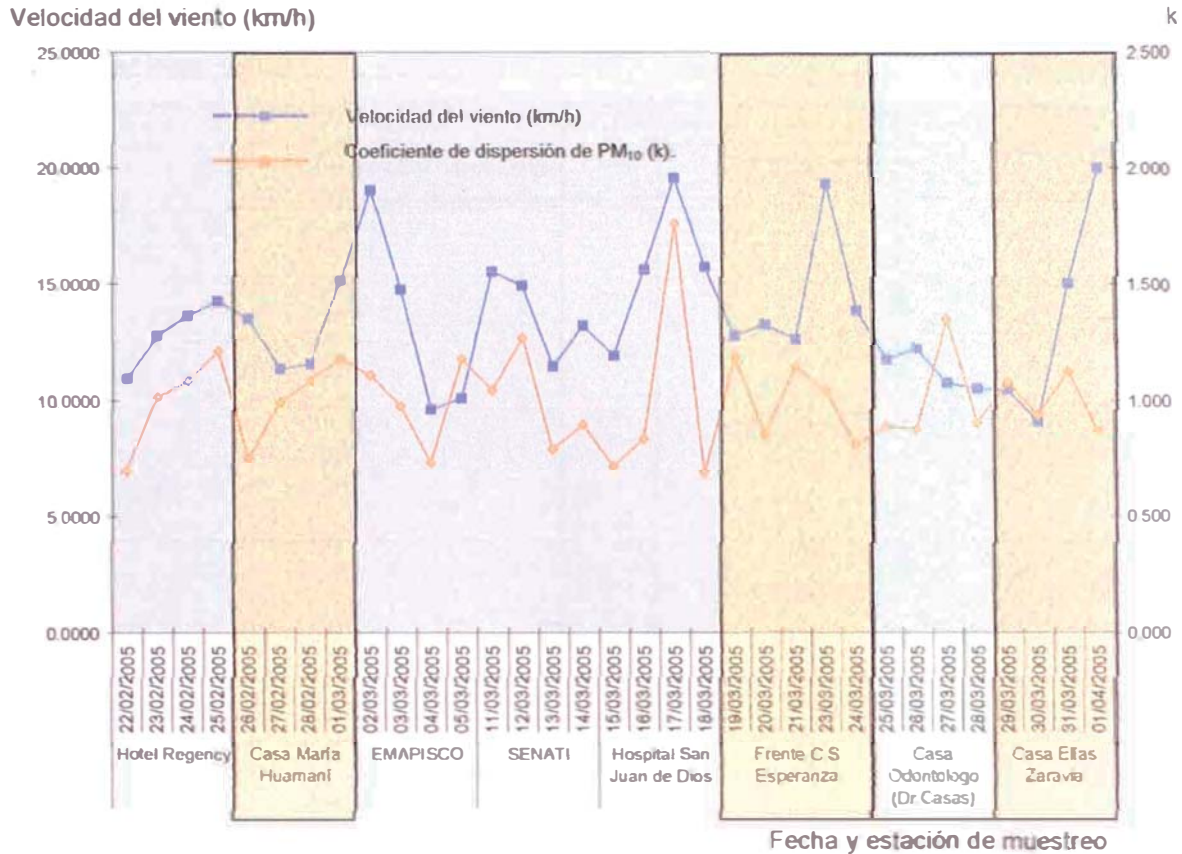


Figura 6.13. Dispersión de PM_{10} (k) y velocidad del viento (km/h) en las estaciones de muestreo del distrito de Pisco entre febrero y abril del 2005 (primera campaña de muestreo).

Por otro lado, la dirección del viento influye en la concentración de PM_{10} dependiendo de la procedencia del mismo, siendo mayor cuando proviene de una fuente natural o antropogénica y menor en ausencia de las mismas.

6.4.5.3. Velocidad del Viento. En la correlación entre la variabilidad de concentración de PM_{10} y la velocidad de viento se han identificado dos patrones dentro del distrito de Pisco. El primero de ellos indica que para la zona urbana de más alta contaminación, los vientos más veloces reducen la presencia del contaminante, atribuido a una dispersión del mismo. Por otro lado, existen zonas, especialmente en

los alrededores de la zona urbana donde la correspondencia entre PM_{10} y velocidad del viento es directa, lo cual podría atribuirse a la existencia de áreas de terreno descubierto cercanas al punto de muestreo.

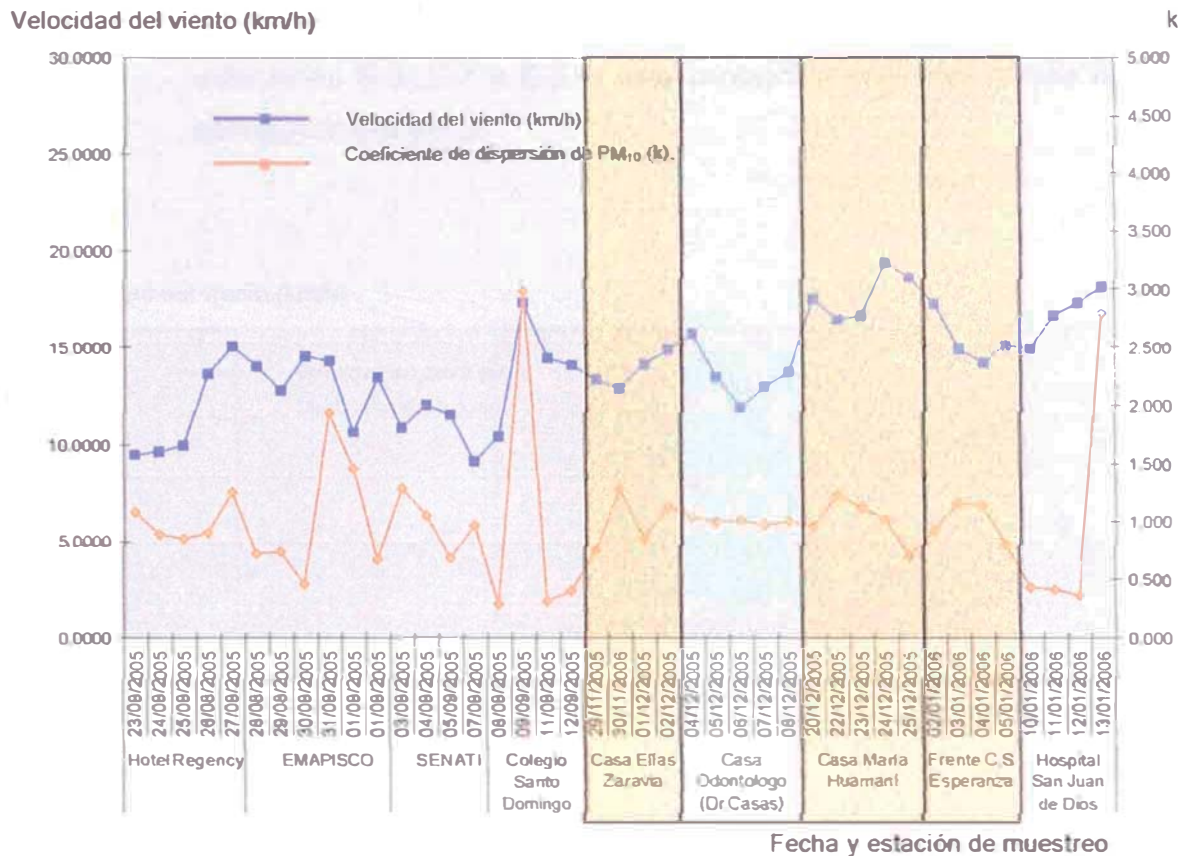


Figura 6.14. Dispersión de PM_{10} (k) y velocidad del viento (km/h) en las estaciones de muestreo del distrito de Pisco entre agosto 2005 y enero del 2006 (segunda campaña de muestreo).

Según la distribución de la velocidad del viento y la variación de la concentración de PM_{10} en las fechas comprendidas en las campañas de muestreo, se tiene una correspondencia directa para la mayor parte de estaciones. Sin embargo cuando se analiza cada grupo de valores por estación de muestreo se tiene que E-2. (Casa María Huamani), E-7. (Frente. C.S. Esperanza) y E-9. (Casa Elías Zaravia) indican una correspondencia inversa; mientras que E-8. (Casa Odontólogo) no existe una variación significativa que se relacione con la velocidad del viento (Figuras 6.13. y 6.14.).

Los coeficientes de correlación de Pearson (Tabla 6.20) entre los valores de k (coeficiente de dispersión de PM₁₀ en una estación de muestreo) y la velocidad del viento indican una correlación positiva para las estaciones E-4, E-1, E-6 y en menor medida E-5; mientras que existe una correlación negativa, aunque de orden bajo, para las estaciones E-9, E-7 y E-2, y una asociación muy baja a nula en las estaciones E-8 y E-3.

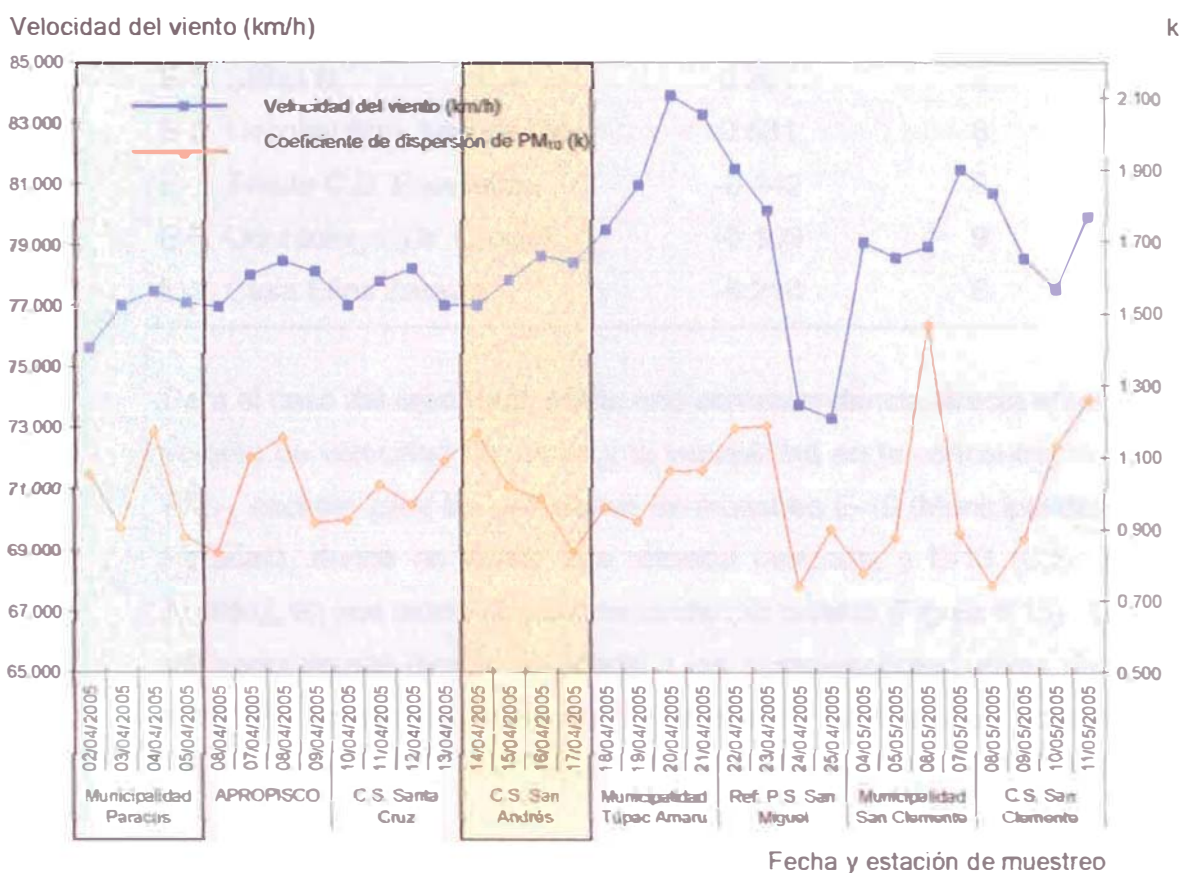


Figura 6.15. Dispersión de PM₁₀ (k) y velocidad del viento (km/h) en las estaciones de muestreo de los distritos de Paracas, San Andrés, Túpac Amaru y San Clemente, entre abril y mayo del 2005 (primera campaña).

Tabla 6.20. Correlación entre en coeficiente de dispersión (k) de la concentración de PM₁₀ y la velocidad del viento en las estaciones de muestreo en el distrito de Pisco.

Estación de muestreo	Coefficiente de Pearson	N
E-1. Hotel Regency	0.610	9
E-2. Casa María Huamani	-0.126	9
E-3. EMAPISCO	-0.006	10
E-4. Colegio Santo Domingo	0.779	4
E-5. SENATI	0.261	8
E-6. Hospital San Juan de Dios	0.531	8
E-7. Frente C.S. Esperanza	-0.142	9
E-8. Odontólogo (Dr. Casas)	-0.109	9
E-9. Casa Elías Zaravia	-0.216	6

Para el caso del área rural, existe una correspondencia directa entre los valores de velocidad de viento y la variabilidad en la concentración de PM₁₀, excepto para las estaciones de muestreo E-10 (Municipalidad de Paracas), donde no existe una relación marcada; y E-13 (C.S. San Andrés), en que existe una correspondencia inversa (Figura 6.15). Esta correspondencia directa responde a las características rurales de las zonas en las que se ubicaron las estaciones de muestreo, rodeadas predominantemente de terrenos desérticos desde donde es arrastrado el material particulado.

Con respecto a la estación E-10 (Municipalidad Paracas) se muestra un patrón similar a las estaciones cercanas a la línea de costa en el distrito de Pisco, hacia donde llega el viento proveniente del océano y donde el contenido de PM₁₀ es significativamente menor. La estación E-13 (C.S. San Andrés) se encuentra cercana a fuentes puntuales de generación de PM₁₀ (ver 6.4.4.2) por lo que un incremento en la velocidad del viento conlleva a una dispersión del material particulado suspendido en el aire y una reducción de su concentración.

6.4.5.4. Dirección del viento. Dentro de la zona de estudio, se tiene información de por lo menos dos estaciones meteorológicas que reportan información sobre velocidad y dirección del viento. De acuerdo a dichas estaciones, la velocidad del viento en la estación Pisco es casi constante, siendo la dirección resultante Oeste-Sur Oeste y la prevaleciente Sur Oeste-Oeste (Environmental Resources Management – ERM Perú S.A., 2003; CONAM, 2004 y 2006)



Figura 6.16. Dirección predominante del viento en la cuenca atmosférica de Pisco. Adaptado de Plan “A limpiar el aire de la ciudad de Pisco”, CONAM, 2006, utilizando imágenes satelitales del software Google Earth v.4.0.2693.

Algunas de las condiciones locales indican que en las localidades cercanas al litoral predominan los vientos SurOeste y en los del interior los vientos del Nor-Oeste. Con respecto a su estacionalidad, durante el verano predominan los vientos del Sur-Oeste, mientras que durante el invierno los vientos Oeste-Sur Oeste.

Estas condiciones de dirección del viento dan una explicación a la tendencia en la distribución de la concentración de PM_{10} , siendo que

esta incrementa siguiendo la dirección del viento. Para ello colabora la presencia de grandes extensiones de terreno expuesto de donde proviene la mayor parte de material particulado que, se estima, constituyen las muestras recogidas en las estaciones ubicadas al este de la cuenca atmosférica.

Como se ha planteado anteriormente, es la dirección del viento uno de los factores determinantes para la distribución de la concentración de PM_{10} sobre todo para aquellas provenientes de fuentes naturales.

6.4.5.5. Vientos Paracas. La zona de estudio, y en general la región desértica del sur del Perú, está expuesta a un fenómeno denominado *vientos Paracas*.

Los vientos Paracas (en el idioma local Paracas significa *lluvia de arena*) se originan en la zona de Pisco y se trasladan hacia localidades del interior, atravesando el desierto costero, llegando a alcanzar velocidades superiores a los 20 m/s y llevan consigo polvo muy fino, reduciendo la velocidad horizontal (Environmental Resources Management – ERM Perú S.A., 2003; INRENA, 2006).

Estos vientos se presentan con mayor frecuencia entre los meses de Agosto y Setiembre, pero pueden ocurrir en cualquier época del año. Según las alertas meteorológicas de la zona de estudio (SENAMHI, 2005 y 2006), en el lapso en el cual fueron tomadas las muestras se pronosticó este fenómeno en 5 oportunidades, con duraciones esperadas entre 48 y 84 horas (Tabla 6.21), sin embargo no se tiene registro de la duración real del fenómeno o si estos se dieron en otras fechas además de las alertadas por SENAMHI.



Figura 6.17. Reducción de la visibilidad producida por la suspensión y transporte de partículas durante la ocurrencia del fenómeno de *vientos Paracas*. Imágenes referidas al Grupo Aéreo 51 Pisco. Fuerza Aérea del Perú. **Fuente:** Cortesía Ing. David Escobar B. Departamento de Operaciones – Sección Meteorología.

Tabla 6.21. Alertas de vientos Paracas emitidas por SENAMHI en el intervalo de muestreo.

Número y fecha de alerta	Inicio	Fin	Duración
015-2005. 11 marzo 2005	11 mar. 2005	15 mar. 2005	84 horas
022-2005. 01 abril 2005	01 abr. 2005	03 abr. 2005	60 horas
029-2005. 01 julio 2005	02 jul. 2005	04 jul. 2005	60 horas
032-2005. 15 julio 2005	15 jul. 2005	17 jul. 2005	58 horas
036-2005. 09 setiembre 2005	10 set. 2005	12 set. 2005	48 horas

Nota: La información mostrada corresponde a la información de alertas meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Disponible en la página web www.senamhi.gob.pe

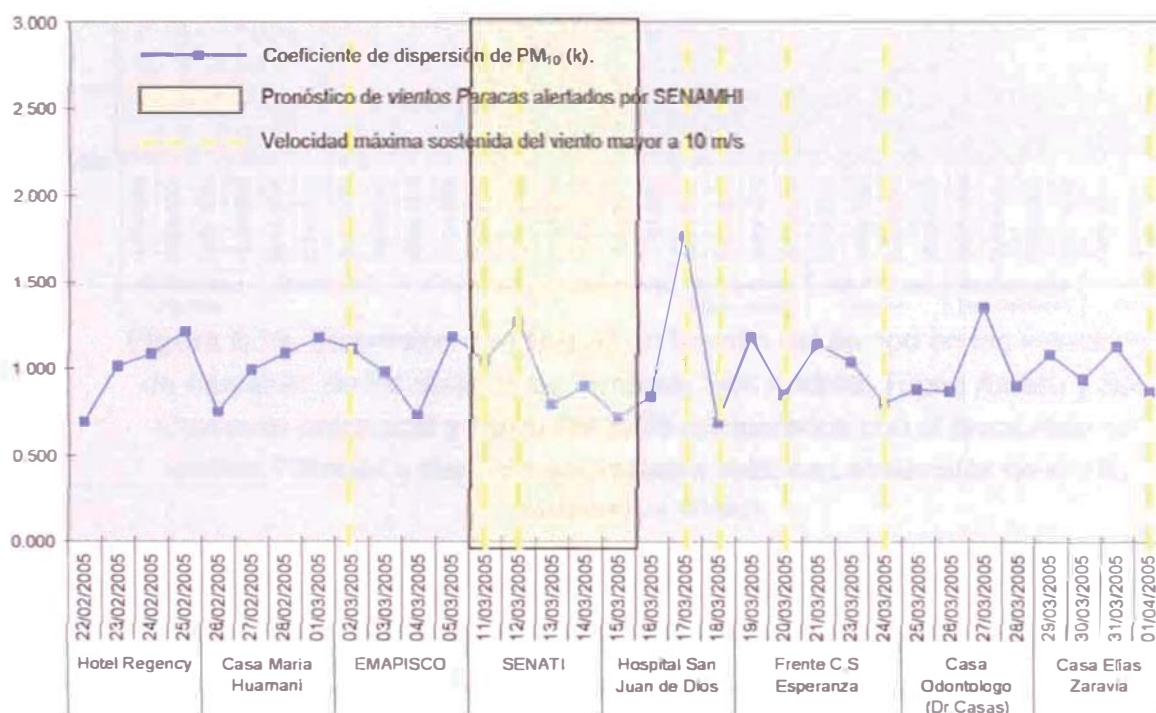


Figura 6.18. Dispersión de PM_{10} (k) en función del tiempo en las estaciones de muestreo del distrito de Pisco entre febrero y abril del 2005 comparados con el pronóstico de vientos Paracas y días con velocidades máximas sostenidas de viento mayores a 10 m/s.

Comparando el pronóstico de ocurrencia de estos fenómenos con la concentración de PM_{10} reportada diariamente, se aprecia una correspondencia con ciertos valores-pico reportados en las estaciones de muestreo, especialmente en las fechas entre el 09 y 11 de setiembre del 2005, donde además se aprecia el valor más alto en concentración de PM_{10} dentro de toda la muestra analizada (Fig. 6.16).

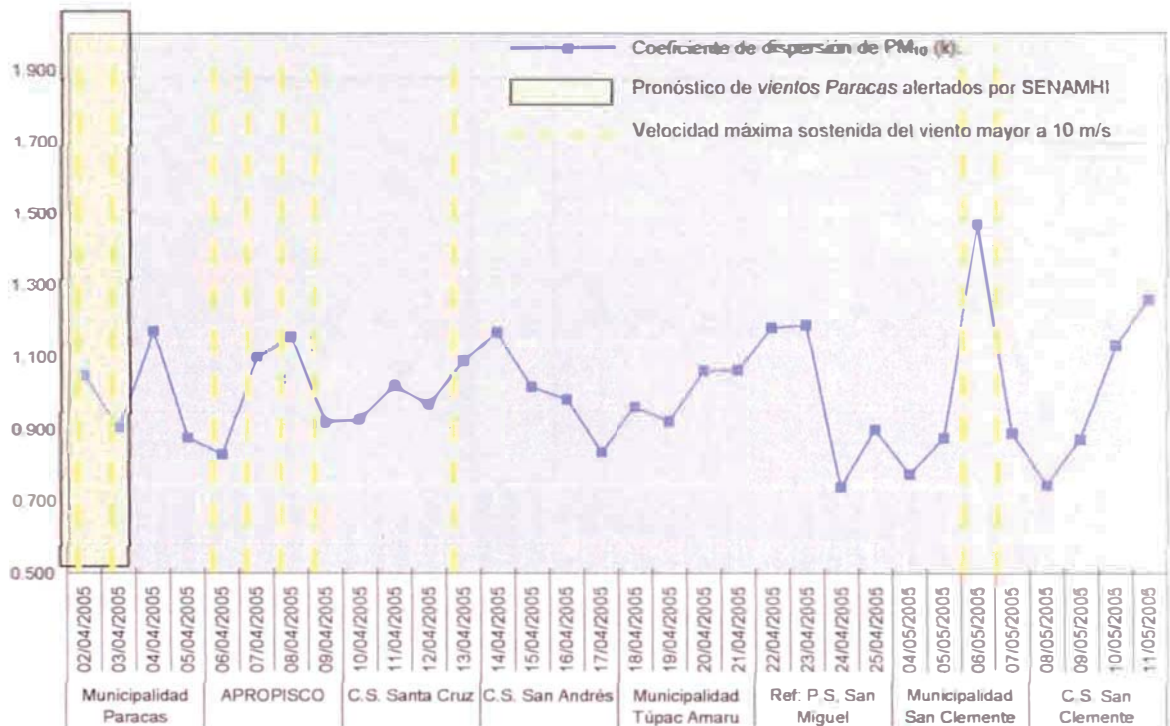


Figura 6.19. Dispersión de PM_{10} (k) en función del tiempo en las estaciones de muestreo de los distritos de Paracas, San Andrés, Túpac Amaru y San Clemente entre abril y mayo del 2005 comparados con el pronóstico de vientos Paracas y días con velocidades máximas sostenidas de viento mayores a 10 m/s

Dado que las alertas anteriormente mostradas no indican necesariamente todas las veces en que ocurrieron fenómenos de *vientos Paracas*, se realizaron pruebas de correlación entre los días con vientos de altas velocidades (velocidad máxima sostenida del

viento mayor a 10 m/s¹¹) y los dos días subsiguientes¹² y la presencia de valores pico, identificados en 6.4.1., así como otros valores elevados dentro de la distribución en una estación determinada.

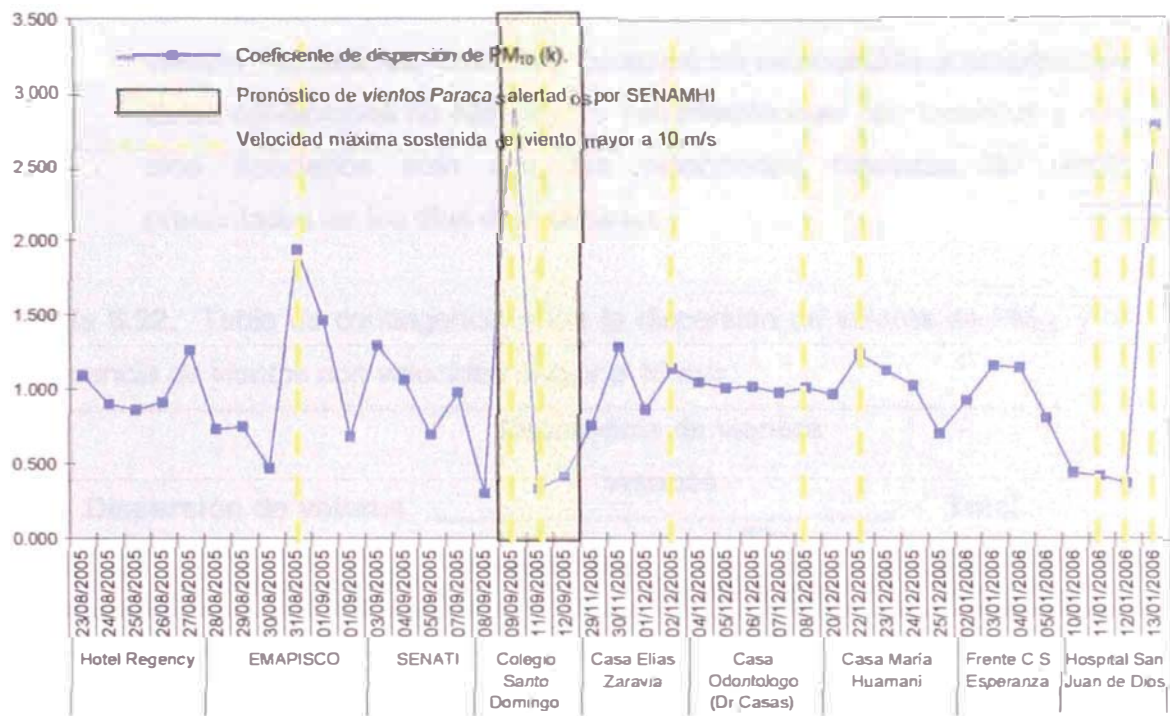


Figura 6.20. Dispersión de PM₁₀ (k) en función del tiempo en las estaciones de muestreo del distrito de Pisco entre agosto del 2005 y enero del 2006 comparados con el pronóstico de vientos Paracas y días con velocidades máximas sostenidas de viento mayores a 10 m/s.

Se aprecia una correspondencia entre los días de vientos de altas velocidades, asociados a los vientos Paracas y la presencia de valores extremos en la muestra analizada. Sin embargo, debido a que los vientos Paracas no sólo se suceden en condiciones de vientos de altas

¹¹ Según las definiciones de vientos Paracas, pese a que este fenómeno no está estrictamente asociado estrictamente a vientos veloces, generalmente se presentan con velocidades mayores a los 22 nudos (11 m/s).

¹² Según la bibliografía al respecto del tema, las partículas responsables del PM₁₀ pueden mantenerse suspendidas hasta 48 horas después de iniciar su suspensión en el aire.

velocidades, influenciados mayormente por condiciones regionales, más que locales (Escobar, 2007¹³).

Los coeficientes de contingencia, r de Pearson y de correlación de Spearman (Tabla 6.22) indican un nivel medio de correlación entre los valores elevados de PM_{10} y las condiciones de viento asociadas a vientos Paracas; sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, estas condiciones no han podido ser establecidas con exactitud y han sido asociados sólo con las velocidades máximas de viento presentadas en los días de muestreo.

Tabla 6.22. Tabla de contingencia entre la dispersión de valores de PM_{10} y la ocurrencia de vientos con velocidad mayor a 10 m/s.

Dispersión de valores	Ocurrencia de vientos		Total
	veloces		
	Influenciado	Sin influenciar	
> 120% promedio	73	19	92
< 120% promedio	7	7	14
Total	80	26	106

* Para ser considerado disperso, el valor de concentración registrado en el día ha superado, por lo menos en 20% el promedio de muestras en la estación de muestreo

Tabla 6.23. Medidas simétricas de contingencia

Coeficiente	Valor	Significancia
Coeficiente de contingencia	0.225	0.017
r de Pearson	0.231	0.017
Correlación de Spearman	0.231	0.017

¹³ Comunicación via e-mail Ing. David Felipe Escobar Baccaro. Dirección de Meteorología Sinóptica del SENAMHI.

6.4.5.6. Temperatura. Con respecto a la temperatura, esta ha sido considerada en el cálculo de la corrección de la concentración de PM₁₀ debido a condiciones de presión y temperatura en 5.6.10. Además, se analizó la correspondencia entre la distribución de PM₁₀ y la variación diaria de la temperatura en la zona de estudio. El análisis entre estas dos variables no muestra una correlación clara, siendo por momentos directa y por otros, inversa y, en algunos períodos se tiene incluso una variación errática (Fig. 6.21 a Fig. 6.23).

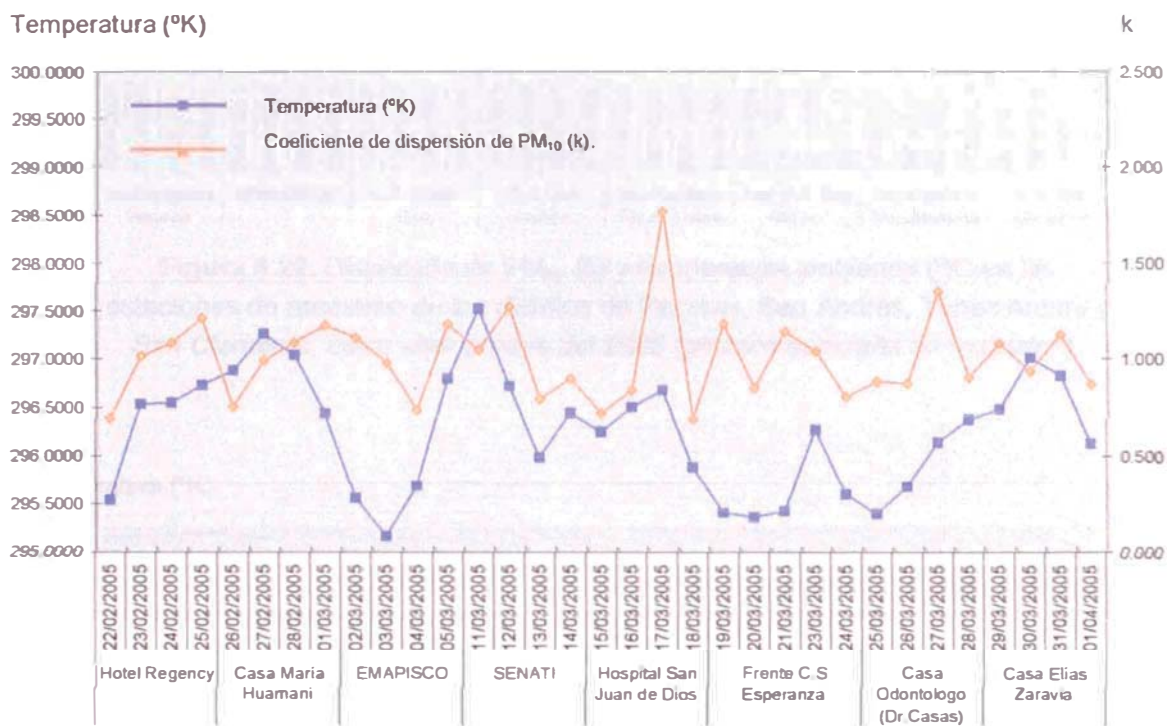


Figura 6.21. Dispersión de PM₁₀ (k) y temperatura ambiental (°K) en las estaciones de muestreo del distrito de Pisco entre febrero y abril del 2005 (primera campaña de muestreo).

Finalmente, de las variables intervinientes definidas al inicio del estudio se puede indicar que se identificaron correlaciones entre la humedad relativa y los vientos (en velocidad y dirección) con respecto a la concentración de PM₁₀ cuantificadas en las estaciones de muestreo. En el caso de la temperatura, su correlación no ha sido directamente observada, aunque se reconoce y calcula su influencia sobre la calibración de los equipos de medición.

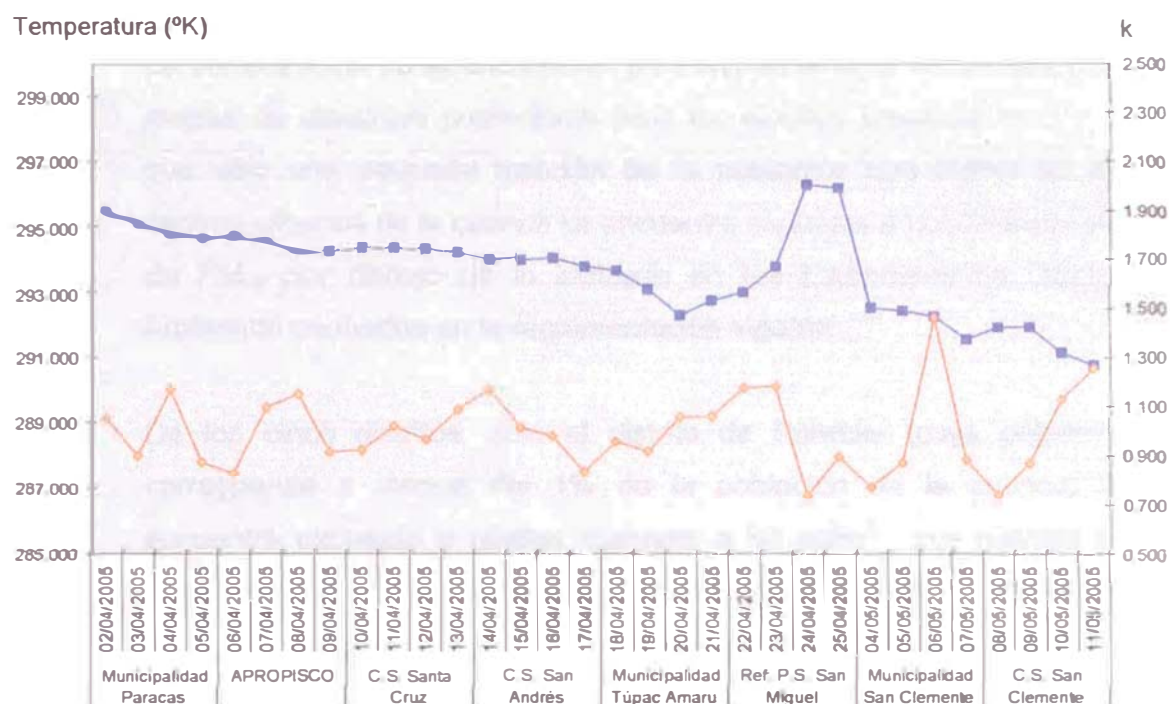


Figura 6.22. Dispersión de PM₁₀ (k) y temperatura ambiental (°K) en las estaciones de muestreo de los distritos de Paracas, San Andrés, Túpac Amaru y San Clemente, entre abril y mayo del 2005 (primera campaña de muestreo).

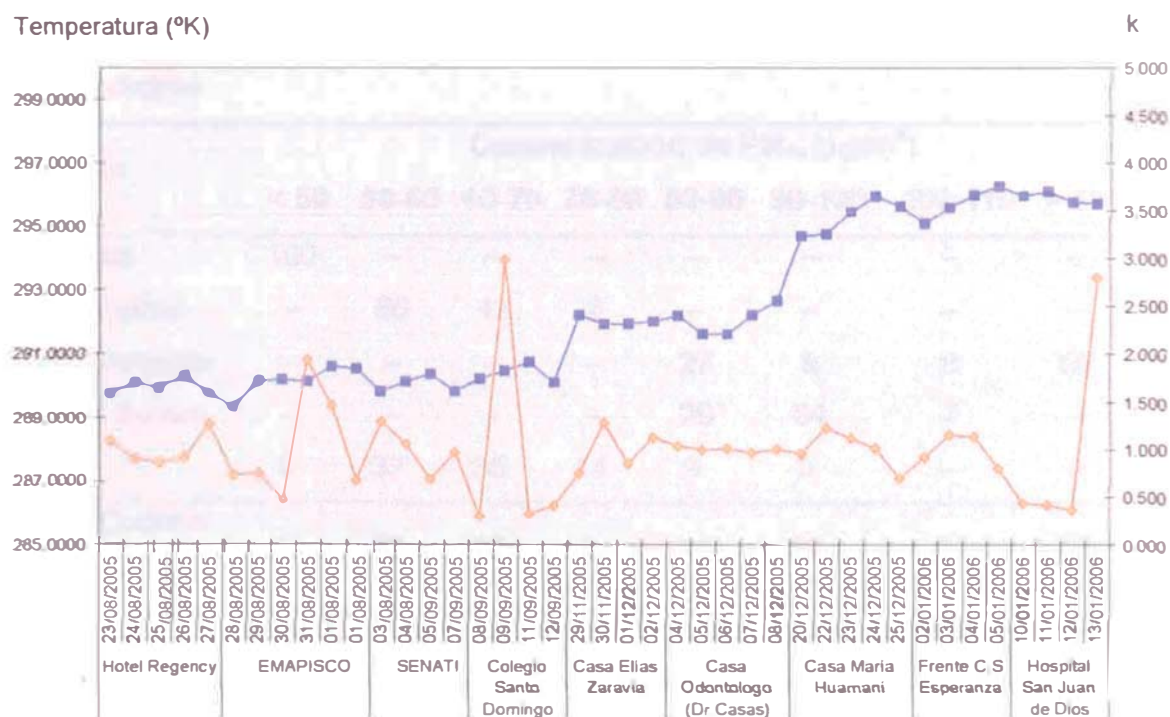


Figura 6.23. Dispersión de PM₁₀ (k) y temperatura ambiental (°K) en las estaciones de muestreo del distrito de Pisco entre agosto del 2005 y enero del 2006 (segunda campaña de muestreo).

6.4.6. Población Expuesta A Niveles Elevados De Concentración De PM₁₀

La comparación de la distribución de PM₁₀ en el área de estudio y los mapas de densidad poblacional para los distritos involucrados indica que sólo una pequeña fracción de la población que habita en los centros urbanos de la cuenca se encuentra expuesta a concentraciones de PM₁₀ por debajo de lo indicado en los Estándares de Calidad Ambiental normados en la reglamentación vigente.

De los cinco distritos, sólo el distrito de Paracas (cuya población *corresponde a menos del 1% de la población de la cuenca*) se encuentra expuesto a niveles menores a 50 µg/m³. Los distritos de Túpac Amaru y San Clemente (correspondientes al 16 y 12% de la *población total de la cuenca*) *presentan niveles siempre superiores a los 80 µg/m³*, mientras que el distrito de San Andrés (con el 14% de la población total) *entre 50 y 80 µg/m³*. Finalmente el distrito de Pisco (que concentra más del 55% de la población total) *entre 45 y 100 µg/m³* (Tabla 6.24).

Tabla 6.24. Porcentaje de población expuesta a niveles de PM₁₀ indicados según distrito.

Distrito	Concentración de PM ₁₀ (µg/m ³)							
	< 50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	> 110
Paracas	100	--	--	--	--	--	--	--
San Andrés	--	66	12	2	--	--	--	--
San Clemente	--	--	--	--	27	8	9	56
Túpac Amaru	--	--	--	--	29	64	7	--
Pisco	2	37	35	14	9	3	--	--
Total Cuenca atmosférica	2	32	22	8	14	11	2	10

Trabajando con la proyección de la población urbana estimada al 2007 para la cuenca atmosférica (CONAM, 2006), se estima que más de 120,000 personas (Tabla 6.25) estarían expuestas a niveles de PM₁₀

que podrían poner en riesgo su salud y presentar algunas de los problemas indicados en el capítulo 2.

Tabla 6.25. Población estimada (al año 2007) expuesta a niveles de PM₁₀ según distrito

Distrito	Población n 2007	Concentración de PM ₁₀ (µg/m ³)	
		< 50 µg/m ³	> 50 µg/m ³
Paracas	945	945	0
San Andrés	16923	0	16923
San Clemente	19430	0	19430
Túpac Amaru	14674	0	14674
Pisco	70996	1176	69820
Total	122968	2121	120847



Figura 6.24. Mapa de densidad poblacional de los distritos de Pisco, Paracas, Túpac Amaru, San Andrés y San Clemente. **Fuente:** Adaptado de Mapa de Densidad Poblacional en “Sistematización y Georeferenciación de Estudios Desarrollados por el Gesta Zonal Aire de la Ciudad de Pisco ” (GD Sistemas SRL., 2004).

CONCLUSION

GENERAL

- Mediante este estudio se ha descubierto que los niveles de contaminación en la ciudad de Pisco y sus alrededores han superado lo descrito en el Decreto Supremo N° 074-2001-PCM.
- Existe una relación directamente proporcional entre las fuentes de generación de este contaminante, ya sea de índole natural o antropogénica, y el grado de distribución y concentración en la cuenca atmosférica analizada.
- La mayoría de la población de la zona estudiada se encuentra expuesta a este tipo de material contaminante particulado.
- Se ha demostrado que los fenómenos meteorológicos y climatológicos conducen a variaciones en cuanto a la concentración y permanencia de este contaminante en cuestión.

ESPECIFICAS

- **De los Aspectos Conceptuales**
 - Las fuentes de contaminación atmosférica en la ciudad de Pisco y sus alrededores que generan la mayor cantidad de emisiones de PTS y específicamente PM₁₀, son de dos tipos: las fijas y las móviles. Las fijas están relacionadas con fuentes puntuales (sector industrial) y de área (sector doméstico, comercial y de servicios). Las fuentes fijas para la provincia de Pisco son en su mayoría provenientes de la industria pesquera y metalúrgica. Las fuentes móviles se encuentran constituidas por los vehículos que conforman el parque automotor.
 - De acuerdo con los resultados del último Censo de Población y Vivienda del año 1993, efectuado por el Instituto Nacional de Estadística e

informática, la población urbana ubicada en la cuenca atmosférica de la ciudad de Pisco alcanzó los 90,249 habitantes, siendo el 95.13% de la población total de la Provincia, y para el año 2004 se estima que dicha población haya alcanzado los 113,813 habitantes, lo cual refleja el 95.8% del total provincial.

- Los contaminantes emitidos por fuentes puntuales y distribuidas son transportados, dispersos, o concentrados por condiciones meteorológicas o topográficas. El ciclo de permanencia aérea se inicia con la emisión de contaminantes, seguidos por el transporte y difusión; completándose con la fijación sobre la vegetación, el ganado, los cuerpos de agua y otros arrastrados por las lluvias, introduciéndose, en algunos casos, nuevamente en la atmósfera por acción del viento.
- En general las partículas menores a $1\ \mu\text{m}$ se producen por conducción, mientras que las mayores por trituración (pulverización) o la combustión.
- Las reacciones químicas en la combustión pueden producir partículas de cúmulos moleculares inestables de poca duración por debajo de $0.1\ \mu\text{m}$. Así también los procesos mecánicos pueden liberar cenizas o partículas de combustible a $1\ \mu\text{m}$ o mayores, si intervienen aspersiones de combustibles líquidos, puede que se escape directamente una ceniza muy fina. Del total de partículas que se forman, entre el 85 y 90% provienen de las fuentes de producción de energía. Las precipitaciones electrostáticas y otros dispositivos de control sirven para remover más del 90% de estas emisiones.
- Existe un fenómeno en las ciudades el cual se denomina efecto de la isla calórica, que consiste en un ciclo de intercambio de masas de aire que ingresan por diferencia térmica entre la zona urbana y sus alrededores.
- En la costa peruana las fábricas de harina de pescado emiten mezclas que contienen óxidos de carbono, trimetilamina, aldehídos, acetonas, ácido

sulfúrico, amoníaco, partículas orgánicas proteicas y sustancia oleaginosas que causan trastornos en la salud y son molestas por el olor que despiden.

- Los principales contaminantes de la atmósfera son: los compuestos gaseosos del carbono, del azufre, del nitrógeno, el ozono, los gases halogenados, los metales y sus derivados, los aerosoles, partículas y otros.
- Entre los efectos de la contaminación atmosférica los más destacados son: la lluvia ácida y el efecto invernadero.
- Las partículas totales en suspensión son una compleja mezcla de sólidos y líquidos formados de una variedad de componentes, incluyendo ácidos (nitratos y sulfatos), químicos orgánicos, metales, suelo y partículas de polvo. Con respecto al tamaño de las partículas, la capacidad de provocar mayores daños a la salud dependerá de cuanto pueda viajar la partícula en el sistema respiratorio.
- Las fuentes de PM_{10} radican en el polvo movido por el viento en zonas áridas, vehículos que atraviesan caminos no pavimentados y operaciones de aplastado y trituración. Los $PM_{2.5}$ pueden provenir de la combustión de combustibles (automóviles, plantas industriales y de generación de energía, etc.) y del polvo fugitivo.
- Los efectos producidos al ambiente por el material particulado pueden ser visibles por las características y concentración como bruma, causando daño a la vegetación y reduciendo la visibilidad.
- El efecto del material particulado sobre la salud humana se presenta como el deterioro del sistema respiratorio y cardiovascular siendo los resaltantes: agudización del asma y enfermedades cardíacas y pulmonares; síntomas respiratorios agudos, incluyendo dolor de pecho, jadeo y tos; disminución de la función pulmonar traduciéndose en falta de aire, bronquitis crónica, muerte prematura, etc.

- Las formas de monitoreo para este tipo de contaminantes se dictamina por el principio gravimétrico, es decir, se capta una muestra de aire en unidades volumétricas, que fluyen a través de un cuerpo filtrante que separa los contaminantes del resto de masa gaseosa. Luego, se pesa la materia conteniendo los contaminantes separados para pesarla. De ese modo se halla la concentración.
 - La eficiencia de colección del MINIVOL es influenciada por la velocidad del viento. La entrada no está diseñada isocinéticamente, así, el flujo del aire alrededor de cobertor lluvia requiere dos cambios de dirección de 90°. A medida que la velocidad del viento se incrementa, el momentum de las partículas asciende y el punto de corte de la entrada del equipo desciende.
 - El Perú ha adoptado los estándares de calidad ambiental de US-EPA, UE y de la ONU para fijar en 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de promedio aritmético anual y los propios en 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ diarios, hasta 3 episodios por año.
- **De los Aspectos Resultantes**
 - Los valores de concentración de PM_{10} oscilaron entre los 29.73 y 485.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con un promedio de 77.21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, una mediana de 64.57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, una desviación típica de 59.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y un coeficiente de variación de 76.44% (lo que indica que la muestra contiene datos altamente dispersos). Superando los valores que sustenta el Decreto Supremo N° 074-2001-PCM que es de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Al 99% de confianza, la concentración promedio es significativamente mayor a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (según las pruebas se confirma esto con una confianza mayor al 99.9%). Al mismo nivel de confianza, el intervalo estimado para la concentración de PM_{10} indica que se excede entre 12.2 y 42.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (34 y 84% respectivamente) el promedio aritmético anual indicado en la norma.
 - Los resultados confirman que se superó 5 veces el valor de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ es decir que dada la distribución de la muestra, el ECA (150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta 3

veces al año) es excedido con una confianza superior al 99.5%, según indica la significancia obtenida.

- La prueba de Kruskal-Wallis muestra que la concentración promedio de PM_{10} es significativamente menor en la ciudad de Pisco con respecto a los distritos alrededores ($\chi^2=9.294 > \chi^2_{\text{crítico al 99\% de confianza}}=6.635$).
- La prueba T y Wilcoxon demuestra que para la ciudad de Pisco el promedio aritmético es superior en $25.97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (52%) y para los otros distritos en $31.711 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (63%), comprobándose nuevamente que la concentración de PM_{10} tiende a ser mayor fuera del distrito de Pisco.
- Los resultados obtenidos indican que en la ciudad de Pisco persiste la condición de exceder los valores normados, es decir, en el transcurso de un año se exceden en más de 3 días los $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} en el aire. Por otro lado, la evidencia estadística indica, a un nivel de confianza menor (97%) que a las afueras del distrito de Pisco esta condición también se repite.
- Con respecto a la distribución superficial de la concentración de PM_{10} en la cuenca atmosférica estudiada, sólo el 11.08% del total se encuentra expuesto a niveles inferiores a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que la tercera parte del área de estudio se encuentra expuesta entre 50 y $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (88% del área total). Finalmente, menos del 1% soportan concentraciones de PM_{10} superior a los $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- La tendencia general de la concentración de PM_{10} en la cuenca atmosférica tiene la dirección de suroeste a noreste. El viento es el que transporta las partículas sueltas de la superficie terrestre, en su mayoría áridas, hacia esta dirección concentrándose a medida que se eleva el porcentaje de área en contacto. Las zonas cercanas al mar son las que contienen el menor grado de concentración.

- Las concentraciones de PM_{10} en cada una de las zonas urbanizadas en el área de estudio, según las pruebas estadísticas de Mann-Whitney y Kruskal-Wallis, sostienen que la zona urbana del distrito de Paracas presenta los menores valores (concentración promedio de $36.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$), seguida por el distrito de San Andrés, Pisco, Túpac Amaru, San Clemente y el centro poblado de Santa Cruz.
- Existen zonas que son discontinuas con respecto a la tendencia de concentración antes descrita, la ciudad de Pisco y el límite entre este y San Andrés que corresponde a la franja industrial de la región.
- En la ciudad de Pisco las pruebas de Mann-Whitney y Kruskal-Wallis señalan que la mayor concentración corresponde a la zona comercial, con niveles superiores a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, alrededor de la estación E-9. Además, predominan concentraciones entre 50 y $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en el límite nor-este se tiene entre 60 y $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Finalmente, los menores valores registrados, menores a los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ indicados en los ECA, se encuentran cerca a la línea de costa. La tendencia en la ciudad responde a una fuente de contaminación vehicular.
- En el límite de Pisco y San Andrés, zona que no permanece congruente con la tendencia regional de contaminación, existen valores de concentración entre 60 y $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ubicados al noreste de la franja costera del distrito de San Andrés donde están instaladas empresas pesqueras. Los vientos en este caso, por medio de la dispersión, pueden reducir la concentración de PM_{10} producido por las industrias.
- La relación de la concentración de PM_{10} es inversamente proporcional con respecto a la humedad relativa en las zonas urbanas en la región estudiada y directamente proporcional en las zonas rurales.
- En las zonas urbanas con alta contaminación la presencia de vientos influyó en la disminución de la concentración de PM_{10} , no así cuando se

analizan zonas rurales donde el viento es el agitador y vector de las partículas en suspensión.

- La velocidad del viento influyó inversamente proporcional a la concentración de PM_{10} en las zonas urbanizadas (asfaltadas) y directamente proporcional en la periferia de la ciudad de Pisco.
- La velocidad del viento en la estación Pisco es casi constante, siendo la dirección resultante Oeste-Sur Oeste y la prevaleciente Sur Oeste-Oeste. La meteorología indica que en las localidades cercanas al litoral predominan los vientos SurOeste y en los del interior los vientos del Nor-Oeste. Con respecto a su estacionalidad, durante el verano predominan los vientos del Sur-Oeste, mientras que durante el invierno los vientos Oeste-Sur Oeste. Esto explica la tendencia de contaminación por PM_{10} en la región estudiada.
- Existe una correspondencia entre los días de vientos de altas velocidades, asociados a los *vientos Paracas* y la presencia de valores extremos en las muestras analizadas.
- No existe una correlación en términos de PM_{10} y temperatura.
- Los habitantes de la Provincia de Pisco son 122 968, 120 847 están expuestos a niveles superiores de PM_{10} . De los cinco distritos, sólo el distrito de Paracas (cuya población corresponde a menos del 1% de la población de la cuenca) se encuentra expuesto a niveles menores a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los distritos de Túpac Amaru y San Clemente (correspondientes al 16 y 12% de la población total de la cuenca) presentan niveles siempre superiores a los $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el distrito de San Andrés (con el 14% de la población total) entre 50 y $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Finalmente el distrito de Pisco (que concentra más del 55% de la población total) entre 45 y $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

RECOMENDACIONES

- En el intento de administrar el recurso aire, es vital coordinar con las instituciones y entidades de planificación física y de actividades lucrativas. En los países en vías de desarrollo como Perú, el Estado no logra ser un organismo que plantee con dinamismo soluciones viables en término de legislación y modernización de sus órganos de control en función del crecimiento económico. Por ello el Estado debe entrar en una etapa intensiva de reforma, principalmente en su Poder Judicial y Legislativo, para que de esa forma logre concertar los objetivos de las diferentes posiciones de la sociedad civil en búsqueda de un desarrollo sostenible incentivando de esa forma una mayor incorporación de mercados locales y extranjeros en pro de la población y del ecosistema.
- El Estado por medio del MINSA y las empresas particulares deben unir esfuerzos para realizar campañas de diagnóstico de enfermedades debido a la contaminación atmosférica así como programas de prevención.
- En los aspectos reglamentarios necesario validar la metodología usada, así como los equipos con el fin de buscar estandarizar las actividades en el proceso de muestreo. Además, el Estado debe asignar dentro del proyecto de ley para la regulación de la carrera pública lo referente a los técnicos en este rubro.
- Con respecto al trabajo de campo algunas recomendaciones radican en las actividades de los técnicos pueden considerar en el momento de realizar la toma de muestras. Es necesario contar con un espacio de muestro que cuente con las medidas de seguridad pertinentes en caso de hurto o vandalismo del equipo y/o las muestras. El horario de muestreo debe ser establecido para que el acceso al lugar de medición sea congruente con el cambio de filtros estipulado en el manual. Siendo los puntos de muestreo instituciones educativas, de salud o municipalidades del Estado, es importante conocer con anticipación las actividades de estas instituciones (incluyendo huelgas) para establecer un cronograma funcional. El cambio de filtros debe hacerse sin la presencia de viento, incluso lo ideal es realizar esta tarea en células que impiden cualquier ingreso de fluidos.

- El manejo de las muestras recolectadas, no incluyó colocarlas en un lugar de refrigeración a 4 grados centígrados para evitar la evaporación de componentes volátiles. Además el contenido de agua no se ha incluido, así también con nitratos vaporizados como ácido nítrico durante el almacenamiento y otras especies. Por ello se recomienda contar con equipos que sirvan de un manejo y transporte adecuado de las muestras que permitan menor nivel de error.
- Los puntos de licuefacción o evaporación de partículas que contienen componentes variados es menor que cuando se toman en forma separada. Incluso decrece en forma significativa si las sales inorgánicas son mezcladas con las sales orgánicas como los ácidos dicarboxílicos. Como consecuencia, las muestras de PM_{10} que contiene soluciones acuosas de componentes orgánicos e inorgánicos no son necesariamente desecadas con el tratamiento acorde al método gravimétrico de referencia (re-acondicionamiento de las muestras de PM_{10} a 50% de HR en una sala acondicionada en acuerdo con CEN, 1998). Para estimar el agua de una muestra de PM_{10} , entonces se debe realizar, por la diferencia de masa entre 50% de HR y condiciones secas ($HR < 5\%$) incluyendo una corrección por la evaporación de material volátil. El manejo de las muestras en el laboratorio no siguieron esta recomendación.
- Es necesario contar con redes meteorológicas, pues la disponibilidad de los datos que puedan proporcionar es de importancia no solo para la contaminación sino también, para la agricultura, el urbanismo, el turismo, las diferentes obras de ingeniería y para llevar a cabo una correcta ordenación del territorio.
- Los puntos de muestreo han estado fijados por estudios anteriores, teniendo como *principal validación* la seguridad. Este motivo no puede *primar* para efectos de descubrir los niveles de concentración en un área. Por ello, lo necesario sería construir torres de muestreo con estructuras de metal que *permitan proteger* los equipos así como *realizar monitoreos a diferentes alturas*, incluyendo datos de meteorología y otros pertinentes. Deben situarse guardando ciertos criterios como: condiciones de representatividad, condiciones

de comparabilidad, requisitos físicos, datos tecnológicos, requisitos prácticos, medidas discontinuas o discontinuas y el diseño definitivo de la red.

- Se necesitan ubicar una mayor cantidad de puntos de muestreo en zonas industriales para realizar una correlación más exacta de lo que sucede en sus inmediaciones así como determinar el tipo de contaminantes que cada muestra contiene en miras de generar programas de control apropiados a la sustancia.
- Los estudios conducidos por Harrison, Jones y Borrowcliffe (2004) han demostrado que los vientos *no influyen* en la contaminación de PM_{10} cuando existen barreras antropogénicas (edificios) que eviten el transporte de estas partículas. La contaminación dentro de la ciudad obedecen otra dinámica que puede ser mejor controlada en los puntos de emisión. Las partículas finas necesitan menos viento para producirse por acciones de otros agentes, la velocidad de este fluido las desimina. Cuando las fuentes de partículas no se encuentran en las zonas estudiadas o no siguen produciendo el contaminante el viento ayudará a la dispersión, mas no cuando las fuentes son constantes el viento sirve como vector. Por ello es importante rediseñar rutas de transporte vehicular para evitar el tráfico en las zonas urbanas de Pisco.
- Debe existir un plan nacional vehicular que fije los niveles de contaminación que producen y su regulación, sobre todo en lugares de alta concentración de estas sustancias dañinas como Pisco; asimismo se debe renovar el parque automotor por medio de incentivos como el bono a la chatarra. El excesivo uso de vehículos de transporte motorizado tipo moto (popularmente conocidos como mototaxis o taximotos) ha producido un tráfico desordenado y centralizado. Se deben crear rutas específicas para este servicio, incluso se puede llegar a fijar días con restricciones vehiculares en la zona urbana durante los vientos Paracas. Además el Estado debe impulsar medidas de migración a sistemas de combustión más idóneos con el medio ambiente como el GNV.
- El SENAMHI no cuenta con un registro de vientos Paracas, sólo con pronósticos que no son corroborados. Esto debe ser vital para diseñar un programa de alertas a nivel regional en los cuales la población deba hacer uso de formas de

protección ya sea en lugares especiales, en sus casas o con equipos proporcionados por el MINSA.

- La fuente de contaminación mayor es la natural, por lo que un plan de forestación en el área sería ideal. El Estado podría dar facilidades para la agricultura en esta zona de tal forma que se llegue a evitar la propagación de partículas por acción de vientos.
- Otras fuentes de contaminación son las móviles, sobre las cuales ya sean dado recomendaciones, y las fijas antropogénicas como los humos provenientes de las industrias pesqueras y las metalúrgicas. Se recomienda realizar estudios más puntuales sobre los efectos de esta industria, realizando caracterizaciones de las muestras. Así también para efectos puntuales de cada industria se consideran prácticas saludables para la atmósfera: limpieza de los gases, reubicación de la fuente, sustitución del combustible, cambios en el proceso, práctica operativa suave y/o clausura de la fuente en casos que se amerite.
- La elección de los dispositivos para captar las partículas dependerá de la eficacia requerida, del grado de dispersión, de su capacidad de agregación, del peligro de explosiones, de la temperatura, humedad, característica de los gases, etc. Los principales métodos para la eliminación de estos contaminantes son; cámara de sedimentación, separadores inerciales, purificación por vía húmeda, filtración y precipitación electrostática.
- Se debe promover de parte de las municipalidades u otras entidades la limpieza de las azoteas de las casas y la pavimentación de vías afirmadas.

BIBLIOGRAFIA

- AEA Energy & Environment (2006). *Air Quality Archive*. London, United Kingdom: UK Department for Environment, Food & Rural Affairs and the Devolved Administrations recuperado el 12 de febrero de 2006 de <http://www.airquality.co.uk/archive/index.php>
- B. Ostro (1998). *Cómo Estimar los Efectos de la Contaminación Atmosférica en la Salud*. California, Estados Unidos: Centro de Estudios Públicos.
- Baldaufa R., Lanea D., Marotza G., Wienerb R., EPA Nacional Exposure Research Lab. (2001, 19 de Julio). Performance evaluation of the portable MiniVOL particulate matter sampler Particulate matter. *PERGAMON* [en línea]. *Atmospheric Environment* 35 (2001) 6087–6091. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/atmosenv> [2001, 19 de Julio].
- Black, R. (2001, 30 de mayo). Air pollution: The view from space. *BBC*. Recuperado el 28 de diciembre de 2005, de <http://news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/1359917.stm>
- Bolin, B. (1991). *The greenhouse effect, climatic change, and ecosystems*. Chichester, United States: John Wiley & Sons Limited.
- Braga C., Teixeira E., Meira L., Wiegand F., Yoneama M., Dias J. (2004, 16 de Noviembre). Elemental composition of PM₁₀ and PM_{2.5} in urban environment in South Brazil. *SCIENCE DIRECT* [en línea]. *Atmospheric Environment* 39 (2005) 1801–1815. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/atmosenv> [2004, 16 de Noviembre].
- Branis M., Domasová M., Faculty of Science, Institute for Environmental Studies, Charles University in Prague (2002, 12 de Agosto). PM₁₀ and black smoke in a small settlement: case study from the Czech Republic. *AE INTERNATIONAL-EUROPE* [en línea]. *Atmospheric Environment* 37 (2003) 83–92. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/atmosenv> [2002, 12 de Agosto].
- Bridgam, H. (1990). *Global air pollution: Problems for the 1990s*. Manchester: United States: John Wiley & Sons Limited.
- C. Hueglin, R Gehrig, U. Baltensperger, M. Gysel, C. Monn and H. Vonmont (2004). *Chemical Characterisation of PM_{2.5}, PM₁₀ and Coarse Particles at Urban, Near-City and Rural Sites in Switzerland*. Swiss Federal Laboratories

- for Materials Testing and Research; Laboratory of Atmospheric Chemistry; Department of Physics, University of Manchester Institute of Science and Technology; Institute for Hygiene and Applied Physiology. Zurich, Switzerland: Elsevier.
- C. Hueglin, R. Gehrig, U. Baltensperger, M. Gysel, C. Monn and H. Vonmont (2004). *Chemical Characterisation of PM_{2.5}, PM₁₀ and Coarse Particles at Urban, Near-City and Rural Sites in Switzerland*. Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research; Laboratory of Atmospheric Chemistry; Department of Physics, University of Manchester Institute of Science and Technology; Institute for Hygiene and Applied Physiology. Switzerland: Elsevier.
 - C. Johansson, M. Norman and L. Gidhagen (2006). *Spatial and Temporal Variations of PM₁₀ and Particle Number Concentrations in Urban Air*. Stockholm, Sweden: Springer Science.
 - Canadian International Development Agency (2003). *Metereología de la Contaminación Atmosférica, Modelación y Monitoreo*. Ottawa, Canadá: SENES Consultants Limited
 - Chemistry Division, Atomic Energy Centre (2005, 25 de mayo). Temporal variations and spatial distribution of ambient PM_{2.2} and PM₁₀ concentrations in Dhaka, Bangladesh. *SCIENCE DIRECT* [en línea]. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/scitotenv> [2005, 25 de mayo].
 - Chun Y., Young C., Hui C., Goggins W. (2004, 3 de diciembre). Effects of Asian dust storm events on daily stroke admissions in Taipei, Taiwan. *SCIENCE DIRECT* [en línea] Environmental Research 99 (2005) 79–84. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/envres> [2004, 3 de diciembre].
 - Colegio Oficial de Físicos (2005). *Contaminación Atmosférica*. Recuperado el 15 de enero de 2007 de <http://www.fisicaysociedad.es/view/default.asp?cat=500>
 - Cuadrat, J. M. y Pita, M. F. (1997). *Climatología*. Madrid, España: Cátedra S. A.
 - De Nevers, N. (1997). *Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire*. Traducido por Pérez, J. Atizapán de Zaragoza, México: Mc Graw-Hill.
 - Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University (2005, 25 de mayo). Characteristics of vertical profiles and sources

- of PM_{2.5}, PM₁₀ and carbonaceous species in Beijing. *SCIENCE DIRECT* [en línea]. *Atmospheric Environment* 39 (2005) 5113–5124. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/atmosenv> [2005, 19 de mayo].
- Dirección General de Salud Ambiental-DIGESA (2000 Estudio de la calidad del aire de la ciudad de Lima metropolitana 1996 - 2000. DIGESA. [En línea]. Disponible en: <http://www.digesa.sld.pe/aire/pdf/ecal1999.PDF> [2006, 28 de Julio].
 - Dirección Ejecutiva de Salud Ambiental – DIGESA (2002, Febrero). Evaluación de la calidad del aire de la ciudad de Pisco. MINSA [en línea]. Disponible en: <http://www.digesa.sld.pe> [2006, 4 de Agosto].
 - E. Wise and A. Comrie (2005). *Meteorologically Adjusted Urban Air Quality trends in the Southwestern United States*. Department of Geography and Regional Development, University of Arizona, *Atmospheric Environment* 39, 2969-2980. Arizona, USA: Elsevier.
 - E. Wise, A. Comrie (2005). *Meteorologically Adjusted Urban Air Quality Trends in the Southwestern United States*. Department of Geography and Regional Development, University of Arizona. Arizona, United States: Elsevier.
 - Economopoulos (2005). *Evaluación de Fuentes de Contaminación de Aire*. Estados Unidos: Mc Graw Hill.
 - Environmental Protection Agency. (2006). United States. Recuperado el 30 de noviembre del 2006 de <http://www.epa.gov/oar/particlepollution/>
 - EPACT - EPA (2004). Air Info Now. Recuperado el 2 de enero de 2006 de http://www.airinfonow.com/espanol/html/ed_particulate.html
 - Espert, V. y López, A. (2004). *Dispersión de Contaminantes en la Atmósfera*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España: Alfaomega.
 - FAO (1986). *Wildland Fire Management Terminology*. Roma, Italia: OMS.
 - Federal Register (1987). *Rules and Regulations*. Vol. 5, No. 126. D.C., United States: US Government.
 - Federal Register (1997). *Rules and Regulations*. Vol. 62, No. 136. D.C., United States: US Government.
 - Ferris J., García J., López J., García F., Ortega J. (2001). Enfermedades asociadas a la polución atmosférica por combustibles fósiles. Aspectos pediátricos [en línea]. *Rev Esp Pediatr* 2001;57(3):213-225. Disponible en: <http://www.pehsu.org/az/pdf/fosiles.pdf> [2001].

- Fundación MAPFRE (1983). *Curso de Higiene Industrial*. Madrid, España: Editorial MAPFRE
- Galdames, D. (2000, 25 de noviembre). *Ingeniería Ambiental y Medio Ambiente*. Recuperado el 26 de diciembre de 2005, de <http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/atmosfera.html>
- Goncalvez F., Carvalho L., Conde F., La Torre M., Saldiva P. Braga A. (2004, 1 de Octubre). The effects of air pollution and meteorological parameters on respiratory morbidity during the summer in São Paulo City. *SCIENCE DIRECT* [en línea]. Environment International 31 (2005) 343– 349. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/envint> [2004, 1 de Octubre].
- Grupo de Estudio Técnico Ambiental – GESTA (2006, Enero). Plan: A limpiar el aire de Pisco. CONAM.
- Grupo Técnico II (2004). Informe de grupo técnico II monitoreo ambiental. *COMISION PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA BAHIA DE PARACAS* [En línea]. Disponible en: <http://www.coman.gob.pe> [2006].
- Heldimir, H. (2005). *Dependants of Air Pollutants on Meteorology*. National Research Institute of Astronomy and Geophysics. Science of the Total Environment 350, 225-237. Cairo, Egypt: Elsevier.
- Hemández, R., Fernández, C., Baptista, P. (2003). *Metodología de la Investigación*. Distrito Federal, México: Mc Graw Hill Interamericana.
- Higgins, T. (1995). *Pollution Prevention Handbook*. Boca Raton, United States: Crc. Press.
- Hooyberghs J., Mensinka C., Dumont G., Fierensb F. (2005, 26 de enero). Chemical characterization of individual particles (PM10) from ambient air in Guiyang City, China. *SCIENCE DIRECT* [en línea]. Science of the Total Environment 343 (2005) 261– 272. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/atmosenv> [2005, 26 de enero].
- Huggett, J. (1997). Contaminación Atmosférica [Versión electrónica]. *Environmental Change: The Evolving Ecosphere*. Recuperado el 27 de noviembre de 2005 de http://www.puc.cl/sw_educ/contam/frcontam.htm
- Instituto Nacional de Estadística en Informática (2005). [en línea]. Lima. Disponible en <http://www.inei.gob.pe> [2006, 05 de junio]. (Grafico 1.2)
- Jorquera H., Departamento de Ingeniería Química y Bioprocesos, Pontificia Universidad Católica de Chile (2001, 10 de Febrero). Air quality at Santiago,

Chile: a box modeling approach II. $PM_{2.5}$, coarse and PM_{10} particulate matter fractions. *PERGAMON* [en línea]. *Atmospheric Environment* 36 (2002) 331–344. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/atmosenv> [2001, 10 de Febrero].

- K. Ho, S. Lee, J. Cao, J. Chow, J. Watson, C. Chan (2006). *Seasonal Variations and Mass Closure Analysis of Particulate Matter in Hong Kong*. Research Center for Urban Environmental Technology and Management. Division of Atmospheric Sciences. Hong Kong, China: Elsevier.
- K. Karar, A. Gupta, A. Kumar and A. Biswas (2006). *Seasonal Variations of PM_{10} and TSP in Residential and Industrial Sites in an Urban Area of Kolkata, India*. Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology, National Engineering Research Institute, NEERI Zonal Centre. *Environmental Monitoring and Assessment* 118, 369-381. Kolkata, India: Elsevier.
- K. Wark y C. Wamer (2005). *Contaminación del Aire: Origen y Control*. Universidad de Purdue. D.F., México: Limusa.
- Kuroiwa, J. (2002). *Reducción de Desastres* (1ra. ed.). Lima, Perú: Quebecor World Perú.
- L. Salter and B. Parsons (1998). *Field Trials of the TEOM and Partisol for PM_{10} Monitoring in the St. Austell China Clay Area, Cornwall, UK*. Centre for Science, Cornwall College, *Atmospheric Environment* 33 (1999) 2111-2114. United Kingdom: Pergamon.
- Lomeli, M., Tamayo, R. e Ilarraza, A. (2000). *Portada Deterioro*. Recuperado el 28 de diciembre de 2005, de <http://www.sagan-gea.org/hojared/CAtm.html>
- M. Hu, L. He, Y. Zhang, M. Wang, Y. Kim, K. Moon (2002). *Seasonal Variation of Ionic Species in Fine Particles at Qingdao, China*. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Environment Research Center. Seoul, South Korea: Elsevier.
- Mazzer D., Lowenthal D., Chow J., Watson J., Grubisic V. (2000, 3 de Agosto). PM_{10} measurements at McMurdo Station, Antarctica. *PERGAMON* [en línea]. *Atmospheric Environment* 35 (2001) 1891-1902. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/atmosenv> [2000, 3 de Agosto].
- Ondarza, R. N. (1993). *Ciencias de la Tierra y el Medio Ambiente* [versión electrónica]. *Ecología: El Hombre y su Ambiente*. Recuperado el 3 de enero

<http://www1.ceit.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/00General/Enlaces.html>

- Ostro B. (1997, 27 de Mayo). Cómo estimar los efectos de la contaminación atmosférica en la salud. Centro de Estudios Públicos [en línea]. Estudios Públicos N° 69. Disponible en: http://www.cepchile.cl/dms/archivo_1630_326/rev69_ostro.pdf [1998].
- Patricio J., Departamento de Física, Universidad de Santiago de Chile (2002, 19 de Junio). Prediction of maximum of 24-h average of PM₁₀ concentrations 30h in advance in Santiago-Chile. *PERGAMON* [en línea]. Atmospheric Environment 36 (2002) 4555–4561. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/atmosenv> [2002, 19 de Junio].
- Proyecto de Ordenamiento Ecológico Territorial del estado de Jalisco-México. Informe final Instituto de Astronomía y Meteorología Dpto. Física, CUCEI. Valentina Davydova Belitskaya.
- Querol X., Alastuev A., Rodriguez S., Plana F., Ruiz C., Cots N. (2001, 6 de Julio). PM₁₀ and PM_{2.5} source apportionment in the Barcelona Metropolitan area, Catalonia, Spain. *PERGAMON* [en línea]. Atmospheric Environment 35(2001)6407–6419. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/atmosenv> [2001, 6 de Julio].
- Querol X., Alastuev A., Rodriguez S., Viana M., Artiñano B., Salvador P., Mantilla E. (2004, 1 de Abril). Levels of particulate matter in rural, urban and industrial sites in Spain. *SCIENCE DIRECT* [en línea]. Science of the Total Environment 334–335(2004)359–376. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/scitotenv> [2001, 1 de Abril].
- Quico A. (2004, Agosto). Estudio epidemiológico por exposición a contaminantes atmosféricos de la población en riesgo de arequipa 2004. *ASOCIACION CIVIL LABOR AREQUIPA* [en línea]. Disponible en: <http://www.labor.org.pe/descargas/Estudio%20Epidemiologico%20por%20Contaminacion.pdf> [2005, 23 de Julio].
- Quijano A., Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Química. Universidad de Pamplona (2000). Promedios geométricos de material particulado fracción respirable (PM₁₀) y detección de metales en el aire de Bucaramanga-Colombia. *UNIVERSIDAD DE PAMPLONA* [en línea]. Bistua Vol.2 N°2. Disponible en: <http://www.unipamplona.edu.co> [2000].

- R. Baldauf, D. Lane, G. Marotz, R. Wiener (2001). *Performance Evaluation of the Portable MiniVOL Particulate Matter Sampler*. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Kansas, KS, USA. US Environmental Protection Agency, National Exposure Research Lab, Research Triangle Park, NC, USA. Atmospheric Environment 35 6087-6091. United States: Pergamon
- R. Harrison, A. Jones and R. Barrowcliffe (2004). *Field Study of the Influence of Meteorological Factors and Traffic Volumes upon Suspended Particle Mass at Urban Roadside Sites of Differing Geometrics*. Division of Environmental Health and Risk Management, School of Geography, Earth and Environmental Sciences, The University of Birmingham. Edbaston, United Kingdom: Elsevier.
- Rodríguez D., Sasaki C., Lorenzi G. (2005, 3 de enero). PM_{2.5} induces acute electrocardiographic alterations in healthy rats. *SCIENCE DIRECT* [en línea]. Environmental Research 99 (2005) 79–84. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com> [2005, 3 de enero].
- S. Salvi and S. T. Holgate (1999). *Mechanisms of Particulate Matter Toxicity*. Clinical and Experimental Allergy, 29, 1187-1194. Southampton, England: Blackwell Science Ltd.
- S. Xie, T. Yu, Y. Zhang, L. Zeng, L. Qi and X. Tang (2004). *Characteristics of PM₁₀, SO₂, NO_x and O₃ in Ambient Air During the Dust Storm Period in Beijing*. Department of Environmental Science, State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control. Pekin, China: Elsevier.
- S.P. Gay Jr. (2004, 17 de Octubre). Blowing sand and surface winds in the Pisco to Chala Area, Southern Peru. *ELSEVIER* [en línea]. Journal of Arid Environments 61 (2005) 101–117. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/jnlabr/yjare> [2006, 4 de Agosto].
- Sánchez J., Valdés S., Ostro B. (1998). Los Efectos En Salud De La Contaminación Atmosférica Por PM₁₀ En Santiago. *CENTRO DE ESTUDIOS PUBLICOS* [en línea]. *Estudios Públicos*, 69. Disponible en: http://www.cepchile.cl/dms/archivo_1632_364/rev69_sanchez.pdf [2006, 19 de Junio].
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). *Norma para Contaminantes Atmosféricos de Fuentes Fijas*. Santo Domingo, República Dominicana: Subsecretaría de Gestión Ambiental.

- Secretaría del Medio Ambiente (2003). *Plan Nacional de Mejoramiento de la Calidad del Aire*. Recuperado el 18 de enero de 2007 de <http://www.sma.df.gob.mx/sma/index.php>
- Secretaria General del Medio Ambiente (2006). *Aire: Contaminación Atmosférica en Uruguay*. Montevideo, Uruguay: Presidencia de la República recuperado el 1 de febrero del 2006 de www.montevideo.gub.uy/ambiente/documentos/infoamb2_06.pdf
- Seoáñez, M. (2002). *Tratado de la Contaminación Atmosférica*. Madrid, España: Mundi Prensa.
- Sistemas de Información Geográfica (2005). *Instituto del Mar del Perú*, [en línea]. Disponible en: <http://www.imarpe.gob.pe/argen/adc/sig/sigpisco.htm> [2006, 05 de junio].
- Slini T., Kaprara A., Karatzas K., Moussiopoulos N. (2004, 4 de Junio). PM_{10} forecasting for Thessaloniki, Greece. *SCIENCE DIRECT* [en línea] Environmental Modelling & Software. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/envres> [2004, 4 de Junio].
- Strahler, H. G y Strahler M. T. (1994). Contaminación Atmosférica [Versión Electrónica]. *Geografía Física*. Recuperado el 26 de noviembre de 2005 de http://www.puc.cl/sw_educ/contam/frcontam.htm
- T. Kuhn, S. Biswas and C. Sioutas (2005). *Diurnal and Seasonal Characteristics of Particle Volatility and Chemical Composition in the Vicinity of a Light-Duty Vehicle Freeway*. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Southern California. Los Angeles, United States: Elsevier.
- Triantafyllou (2001). *PM_{10} Pollution Episodes as a Function of Synoptic Climatology in a Mountainous Industrial Area*. Laboratory of Environmental Physics and Technology, Department of Geotechnology and Environmental Engineering of West Makedonia. Kozani, Greece: Elsevier.
- Viana M., Querol X., Alastuey A., Institute of Earth Science. (2005, 30 de Mayo). Chemical characterisation of PM episodes in NE Spain. *CHEMOSPHERE* [en línea]. Chemosphere. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/chemosphere> [2005, 30 de Mayo].
- Vinitketkumnun U., Kalayanamitra K., Chewonarin T., Kamensa R. (2002, 21 de Mayo). Particulate matter, PM_{10} & $PM_{2.5}$ levels, and airborne mutagenicity in

Chiang Mai, Thailand. *ELSEVIER* [en línea]. *Mutation Research* 519 (2002) 121–131. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/gentox> [2002, 21 de Mayo].

- Vizcarra, M. (1982). *Tecnósfera: La Atmósfera Contaminada y sus Relaciones con el Público*. Lima, Perú: MAVA.
- Wales, J. & Sanger, L. (2001). *Wikipedia* [Versión electrónica]. GNU Free Documentation License. Fundación del Software Libre. Recuperado el 28 de diciembre de 2005, de <http://es.wikipedia.org/wiki/Contaminaci%C3%B3n>
- WHO (2006). *Air Pollution*. England: United Press. Recuperado el 13 de febrero de 2006 de <http://www.greenfacts.org/es/glosario/pqrs/particulas-finas.htm>
- WIKIPEDIA La enciclopedia libre (2006). *Pisco (ciudad)*, [En línea]. Jimmy Wales y Larry Sanger Editores. Disponible en: [http://es.wikipedia.org/wiki/Pisco_\(Per%C3%BA\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Pisco_(Per%C3%BA)) [2006, 05 de junio].
- Wisconsin Department of Natural Resources (2005). *Inhalable Particles* Recuperado el 3 de enero del 2006 de <http://www.dnr.state.wi.us/>
- Xiea R.K., Seipa H.M., Leinumb J.R., Xiaod J.S. (2004, 27 de octubre). A neural network forecast for dailyaverage PM₁₀ concentrations in Belgium. *SCIENCE DIRECT* [en línea]. *Atmospheric Environment* 39 (2005) 3279–3289. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/scitotenv> [2004, 27 de octubre].

ANEXO 1

1.1. Control de las Partículas Primarias

Las mayor parte de partículas que se encuentran son secundarias, sin embargo existen también una cantidad importante de primarias (metales pesados, asbesto, etc.) que son más tóxicas pequeñas como para ser respirables. Así, el problema de contaminación del aire se centraliza en el control de las primarias por ser estas más manejables y reciclables. Entre las tecnologías que se utilizan para captar los contaminantes tenemos:

1.1.1. Aparatos de Captura por Pared. Los tres primeros tipos de aparatos de control que se consideran son: sedimentadores por gravedad, separados de ciclón y precipitadores electrostáticos, funcionan al impulsar las partículas hacia una pared sólida, en donde se adhieren entre sí para formar aglomerados que se pueden extraer del aparato colector y disponer de ellos. Aun cuando el aspecto de estos aparatos son distintos el principio que los rige es el mismo y se aplican las mismas ecuaciones generales de diseño.

1.1.1.1. Sedimentadores por Gravedad. Es una cámara larga por la cual pasa lentamente la masa de fluido contaminado, permitiendo que transcurra el tiempo suficiente para que las partículas se sedimenten por gravedad hasta el fondo. Es un dispositivo que se debe limpiar, su costos de mantenimiento es mínimo, el cálculo matemático es sencillo y tiene auge en las industrias que tratan gases muy secos (fundidoras y metalúrgicas).

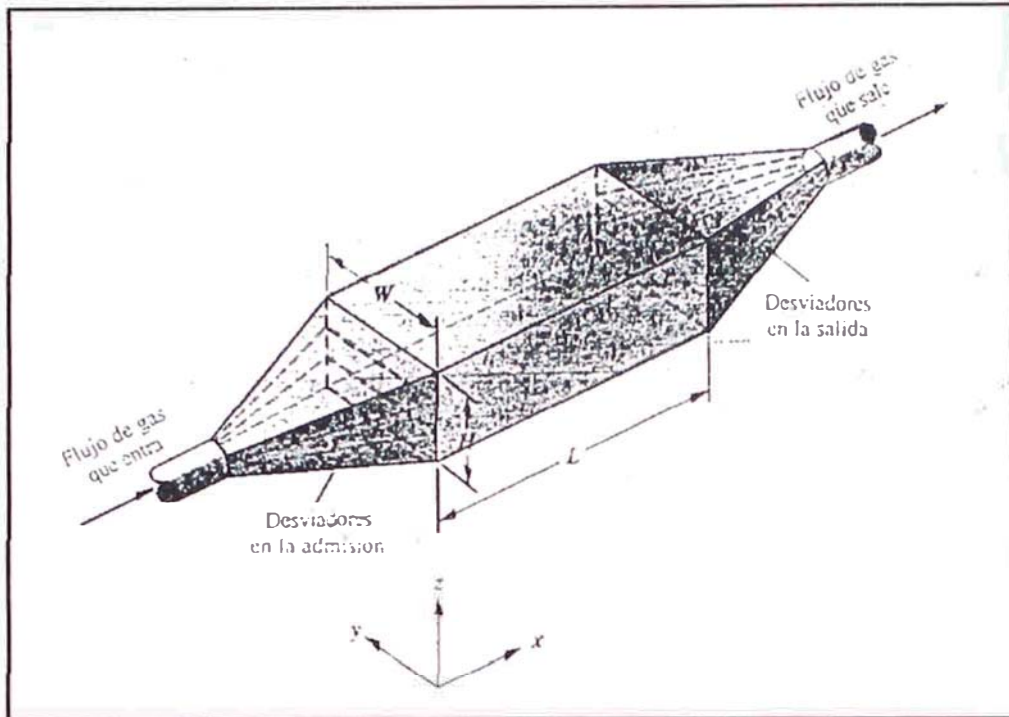


Figura 1.1. Esquema de un sedimentador típico por gravedad.

La figura 1.1 se observa un un sedimentador por gravedad. El área de su sección transversal (WH) es mucho más grande que la del ducto que se aproxima a él o por el que sale el gas, de modo que la velocidad de este último en el interior es mucho más baja que en cualquiera de los ductos. Se utilizan desviadores de algún tipo para dispersar el flujo entrante en forma uniforme a través de la cámara de sedimentación; sin ellos, la mayor parte del flujo pasará por medio y se tendrá por resultado una mala captura de partículas.

Para calcular el comportamiento de este aparato, se supone que el fluido que pasa por ello son se mezcla en su totalidad (modelo de flujo en bloque o flujo tapón) o se supone un mezclado total en todo el aparato o en toda la sección transversal al flujo. Los dos modelos se aplican en cálculo de aparatos de control de contaminación del aire.

Para el flujo en bloque, la velocidad horizontal promedio del gas en la cámara es

$$V_{prom} = \frac{Q}{WH}$$

Para el modelo de flujo en bloque se asume: en todo punto de la cámara la velocidad horizontal del gas es a igual a la velocidad promedio; la componente horizontal de la velocidad de las partículas que se encuentran en el fluido siempre es igual a la velocidad promedio; la componente vertical de las partículas que se encuentran en el fluido es igual a su velocidad terminal de sedimentación debida a la gravedad (V_t); si una partículas se deposita en el piso, no vuelve a ser arrastrada.

Considérese ahora una partícula que ingresa a la cámara con altura h . el tiempo que tardará el fluido que la distribuye y entra con ella en recorrer la cámara en la dirección del flujo es

$$t = \frac{L}{V_{prom}}$$

Durante ese tiempo, la partícula se sedimentará por la gravedad una distancia,

$$\text{Distancia vertical de sedimentación} = tV_t = V_t \frac{L}{V_{prom}}$$

Si esta distancia es mayor que h (la distancia original arriba del piso) o igual a esta, entonces llegará al piso de la cámara y será capturada. Si todas las partículas son del mismo tamaño (y, por consiguiente, tienen el mismo valor de V_t), entonces existe cierta distancia arriba del piso (en la admisión) debajo de la cual todas las partículas serán capturadas y arriba de la cual ninguna de ellas lo será. Si ahora se supone además que todas las partículas son del mismo tamaño, que se encuentran distribuidas uniformemente a través de al admisión y que no interactúan entre sí, entonces se puede decir que la fracción de partículas que serán capturadas, que es la eficiencia fraccionaria de captura, es

$$\text{Fracción capturada} = \eta = \frac{LV_t}{HV_{prom}} \text{ para el flujo en bloque}$$

Para calcular la relación eficiencia-diámetro de partícula, se reemplaza la velocidad terminal de sedimentación en la ecuación anterior con las relaciones de sedimentación por gravedad. Para la mayor parte de las aplicaciones en la contaminación del aire resulta apropiada la ley de Stokes, (ignorándose la densidad del aire), entonces

$$\eta = \frac{LgD^2 \rho_{part}}{HV_{prom} 18\mu} \text{ para el flujo en bloque.}$$

Para considerar ahora el modelo de flujo mezclado, supóngase que el flujo de fluido en su totalidad en la dirección z, pero no en la dirección x. (La mayor parte de los flujos de gases reales son turbulentos, lo que conduce al mezclado interno en el equipo de proceso). Esto tiene sentido, porque el mezclado en la dirección x mueve las partículas contra la corriente y corriente abajo, con poco efecto en la eficiencia de captura, en tanto que el mezclado en la dirección z conduce a una disminución en esa eficiencia. Entonces, considérese una sección del sedimentador con longitud dx. En esta sección, la fracción de las partículas que llegarán al piso será igual a la distancia vertical que cae una partícula promedio, debido a la gravedad, a pasar por la sección, dividida entre la altura de la sección, lo cual puede escribirse como:

$$\text{Fracción capturada} = \frac{V_t dt}{H}$$

El cambio de la concentración que pasa por esta sección es

$$dc = -c \cdot \text{fracción capturada} = \frac{-cV_t dt}{H}$$

El tiempo que tarda la partícula promedio en pasar por esta sección es

$$dt = \frac{dx}{V'_{prom}}$$

Si se combinan estas ecuaciones y se acomodan, se tiene

$$\frac{dc}{c} = -\frac{v_t}{HV'_{prom}} dx$$

Lo cual puede integrarse desde la admisión ($x=0$) hasta la salida ($x=L$) para hallar

$$\ln \frac{C_{salida}}{C_{entrada}} = -\frac{V_t L}{HV'_{prom}}$$

O bien

$$\eta = 1 - \left(\frac{C_{salida}}{C_{entrada}} \right) = 1 - \exp\left(-\frac{V_{tL}}{HV'_{prom}}\right)$$

Por último, se puede sustituir V_t por su expresión de la ley de Stokes, para encontrar

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{LgD^2 \rho_{part}}{HV'_{prom} 18\mu}\right) \text{ flujo mezclado}$$

Si se compara este resultado con el de la hipótesis para el flujo en bloque se escribiría

$$\eta_{mezclado} = 1 - \exp(-\eta_{flujoenbloque})$$

Para hallar las eficiencias para otros diámetros de partícula, se observa que la eficiencia para el flujo en bloque es proporcional al cuadrado del diámetro de partícula, de modo que se puede construir una tabla para las eficiencias con este tipo de flujo, por medio de relaciones sencillas respecto al valor para 1 μm y, a continuación, calcular las eficiencias correspondientes para el flujo mezclado, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1.1.

Diámetro de Partícula, μ	η_{bloque}	$\eta_{mezclado}$
1.00	0.000303	0.000303
10.00	0.0303	0.0298
30.00	0.273	0.239
50.00	0.76	0.53
57.45	1.00	0.63
80.00	-	0.86
100.00	-	0.95
120.00	-	0.99

Para las partículas pequeñas, para las que las eficiencias calculadas de captura son diminutas, los modelos de flujo mezclado y en bloque prácticamente dan la misma respuesta. Para las partículas más grandes, las eficiencias calculadas de captura se vuelven más grandes y los dos modelos dan respuestas diferentes. El modelo de flujo en bloque indica la eficiencia que alcanza el 100% para un diámetro de partícula de 57.45 μm , en tanto que el modelo de flujo mezclado indica que la eficiencia tiende asintóticamente al 100% para partículas de mayor tamaño que alrededor de 100 μm . Si se sustituye un diámetro de 100 μm en la ecuación del flujo en bloque, se encuentra una eficiencia del 303%, lo cual no tiene significado.

Se puede adquirir una idea de estos dos modelos al preguntarse cómo se vería la pila de polvo sobre el pis, si se hiciera funcionar un sedimentador por gravedad con un polvo de un solo tamaño durante un largo periodo, y luego se parara. En el modelo de flujo de bloque, se esperaría una pila de altura absolutamente uniforme que termina a esa longitud para la que $L = HV_{prom}/V_t$. Para el modelo del flujo mezclado, se esparcía una pila más profunda en el extremo de la admisión y cuya profundidad cae en forma exponencial, tendiendo asintóticamente a cero conforme L se hace grande.

Este tipo de aparato sería útil para la captura de partículas con diámetros de quizá 100 μm (arena fina), pero no para partículas de interés en la contaminación del aire, cuyos diámetros van hasta fracciones de micra. Se podría aumentar la eficiencia al hacer L más grande (lo que haría que el aparato sea muy largo y costoso), al hacer H más pequeña (lo que se puede lograr subdividiendo la cámara con placas horizontales y que hace la limpieza más difícil), al disminuir V_{prom} (lo cual requiere un área más grande de la sección transversal, por consecuencia, un aparato más grande y costoso), o bien, el aumentar g. Lo último en mención es la posibilidad más práctica, requiere la sustitución de la fuerza de la gravedad por alguna otra fuerza en la impulsión de las partículas de la corriente de gas hacia la superficie recolectora.

Los sedimentadores pequeños por gravedad para el muestreo de partículas a veces se los conoce como elutriadores horizontales. En ellos, el flujo del aire es muy lento y las partículas se capturan por gravedad sobre placas engrasadas, para su examen microscópico subsiguiente.

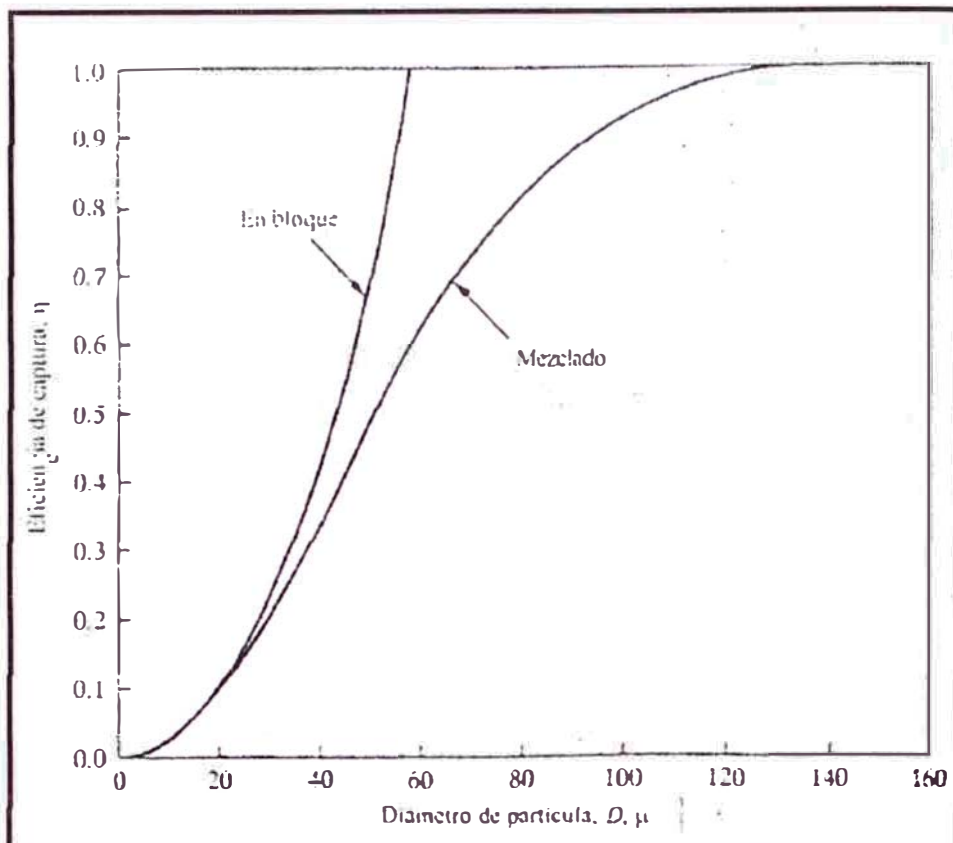


Figura 1.2. Comparación de las eficiencias para un sedimentador por gravedad, calculados por medio de los modelos flujo en bloque y mezclado.

1.1.1.2. Separadores Centrifugos. El método anterior no ofrece mayores beneficios en el área industrial. Por ello la seudofuerza centrífuga es empleada de la siguiente manera. Si un cuerpo se mueve en una trayectoria circular con radio r y velocidad V_c a lo largo de esa trayectoria, entonces tiene una velocidad

$$\text{angular } \omega = \frac{V_c}{r} \text{ además Fuerza centrífuga} = \frac{mV_c^2}{r} = m\omega^2 r$$

Incluso con velocidades modestas y radios comunes, las fuerzas centrífugas que actúan sobre las partículas pueden ser de dos órdenes de magnitud mayores que las de la gravedad. Por ello los separadores centrifugos son más útiles que los sedimentadores por gravedad.

Si se sustituye la aceleración gravitacional por esta centrífuga en la ecuación se tendría

$$V_i = \frac{V_c^2 D^2 \rho_{part}}{18 \mu r}$$

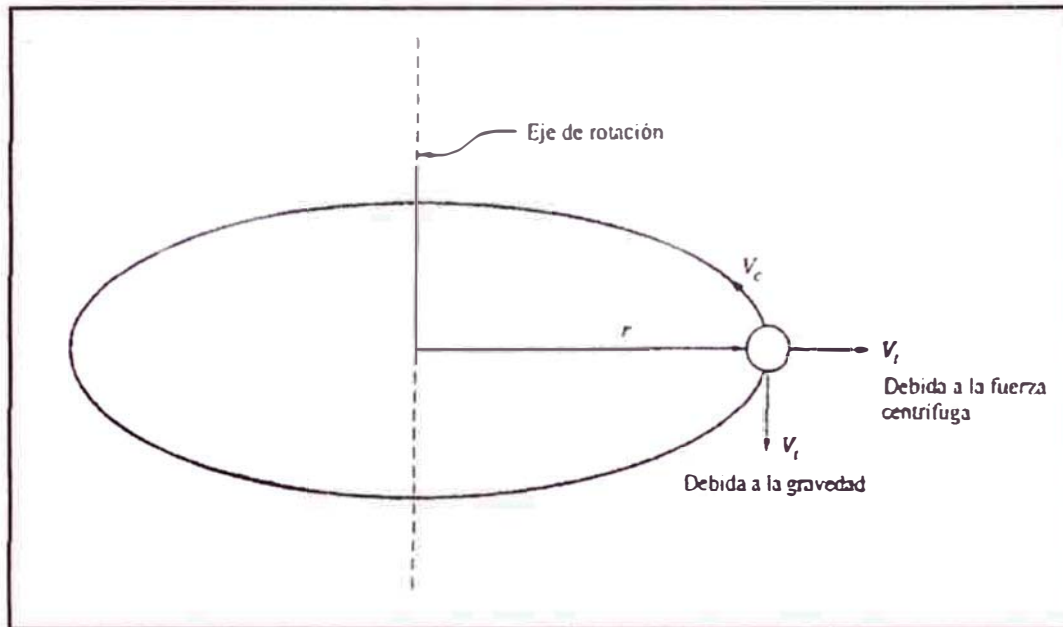


Figura 1.3. Relación entre los términos definidos para el movimiento de rotación.

Si se toma el punto de vista de una persona que viaje sobre la partícula su puede ver que la trayectoria del fluido que los rodea se encuentra en movimiento circular turbulento y rápido, con un movimiento de remolino turbulento que los mueve hacia el centro; en seguida, otro que los mueve alejándolos del centro, etc. Sin embargo, en la vecindad inmediata de la partícula existe un pequeño neto de esta, relativo al gas que la rodea, causado por la fuerza centrífuga. Este movimiento neto de la partícula, sobrepuesto al flujo global turbulento del gas, es el que causa el movimiento promedio radialmente hacia fuera de la misma y es el que se analiza en esta sección.

Existen algunos aparatos con este principio, en forma generalizada y al d mayor uso mundial, se le conoce como el separador de ciclón. Como muestra la fig. 4.46, un ciclón consta de un cuerpo cilíndrico vertical, con una salida para el polvo en el fondo cónico. El gas entra por una admisión rectangular, normalmente el doble de alto que de ancho, dispuesta en forma tangencial al

cuerpo circular del ciclón, de modo que el gas entrante fluya alrededor de la circunferencia del cuerpo cilíndrico, no de manera radial hacia adentro. El gas se mueve en espiral alrededor de la parte exterior del cuerpo cilíndrico con una componente hacia abajo; en seguida, se vuelve y se mueve en espiral hacia arriba y sale por la parte superior del aparato. Durante el movimiento exterior en espiral del gas, las partículas son impulsadas hacia la pared por la fuerza centrífuga, en donde son capturadas, se juntan entre sí y forman aglomerados más grandes que se deslizan hacia abajo por la acción de la gravedad y son recogidas en la tolva para el polvo del fondo.

El separador de ciclón como se observa en la figura es un sedimentador por gravedad construido en la forma de dos hélices concéntricas. Sólo la hélice exterior contribuye a la captura; las partículas que son llevadas hacia la hélice interior, que fluye hacia arriba hasta la salida del gas, escapan sin ser capturadas.

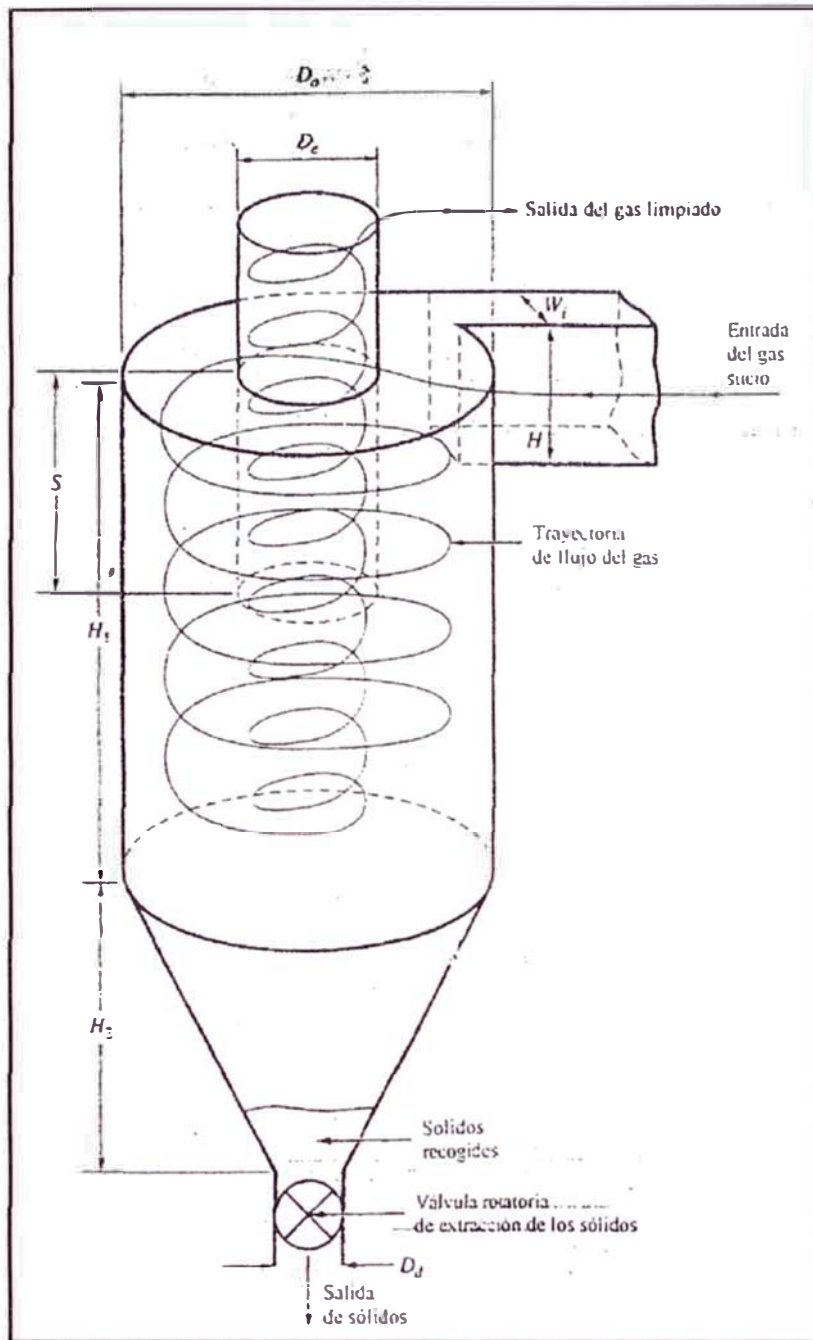


Figura. 1.4. Esquema de un separador de ciclón. Por lo general, las dimensiones se basan en el diámetro total D_0 . Tomados como relaciones a esa dimensión, $W_1=0.25$, $H=0.5$, $H_1=2$, $H_2=2$, $D_e=0.5$, $S=0.625$, $D_d=0.25$. Por ejemplo, si $D_0=1$ ft, entonces $W_1=0.25$ ft, etc. Ashbee y Davis sostienen que las diferencias principales son que los ciclones de alta eficiencia tienen valores más pequeños W_1 , mientras que los ciclones de alto rendimiento tienen valores más grandes de W_1 y de D_e . Las dimensiones que se dan aquí son para el diseño "convencional".

De este modo, la hélice exterior es equivalente al sedimentador por gravedad. La corriente en la admisión tiene una altura W_i en la dirección radial, de modo que la distancia máxima que debe moverse cualquier partícula para alcanzar la pared es esa W_i . La distancia comparable en el sedimentador por gravedad es H . La longitud de la trayectoria del flujo es $N\pi D_o$, en donde N es el número de vueltas que el gas realiza al recorrer la hélice exterior del ciclón, antes de entrar a la hélice interior y D_o es el diámetro exterior del propio ciclón. Esta longitud de la trayectoria del flujo corresponde a L en el sedimentador por gravedad. Si se hacen estas sustituciones directamente en las ecuaciones de este último se tendría

$$\eta = \frac{N\pi D_o V_t}{W_i V_c} \text{ flujo en bloque}$$

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{N\pi D_o V_t}{W_i V_c}\right) \text{ flujo mezclado}$$

Sustituyendo la expresión en la ley de Stokes se tiene,

$$\eta = \frac{\pi N V_c D^2 \rho_{part}}{9 W_i \mu} \text{ flujo en bloque}$$

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\pi N V_c D^2 \rho_{part}}{9 W_i \mu}\right) \text{ flujo mezclado}$$

Donde, D es el diámetro de partícula. El diámetro exterior del ciclón D_o , no aparece directamente sino sólo de manera indirecta a través de W_i , que es proporcional a él. El parámetro N , que representa el número de vueltas que el gas realiza alrededor del ciclón. Como se hizo en el ejemplo anterior se tiene la tabla siguiente:

Tabla 1.2.

Diámetro de Partícula, μ	η_{bloque}	η_{mezclao}
0.100	0.000232	0.000232
1.000	0.0232	0.0230
2.000	0.0930	0.0888
3.000	0.209	0.189
4.000	0.372	0.311
5.000	0.582	0.441
6.559	1.00	0.632
10.000	-	0.902
15.000	-	0.995

Al comparar este resultado con el de las cámaras e sedimentación por gravedad, se ve que la forma del resultado es la misma, pero es mucho más pequeño el tamaño de partícula por el cual el aparato es eficaz. Las gráficas son idénticas, pero con la escala del diámetro multiplicada por el factor 0.114. Esto sucede porque los modelos y sus ecuaciones resultantes son los mismos, excepto por la sustitución de la fuerza de la gravedad por la centrífuga y el cambio de en las dimensiones.

El concepto de diámetro de corte, indica una medida del tamaño de partículas capturadas y el tamaño que *pasa por un colector de partículas*. La tendencia es definir el diámetro de corte como el de una partícula para que la curva de eficiencia tenga el valor de 0.50.

Sustituyendo esta definición en la ecuación anterior y despejando el diámetro de corte que se adapta al modelo de la ley Stokes y el flujo en bloque para hallar:

$$D_{\text{corte}} = \left(\frac{9W_i \mu}{2\pi N V_c \rho_{\text{part}}} \right)^{1/2} \text{ flujo en bloque}$$

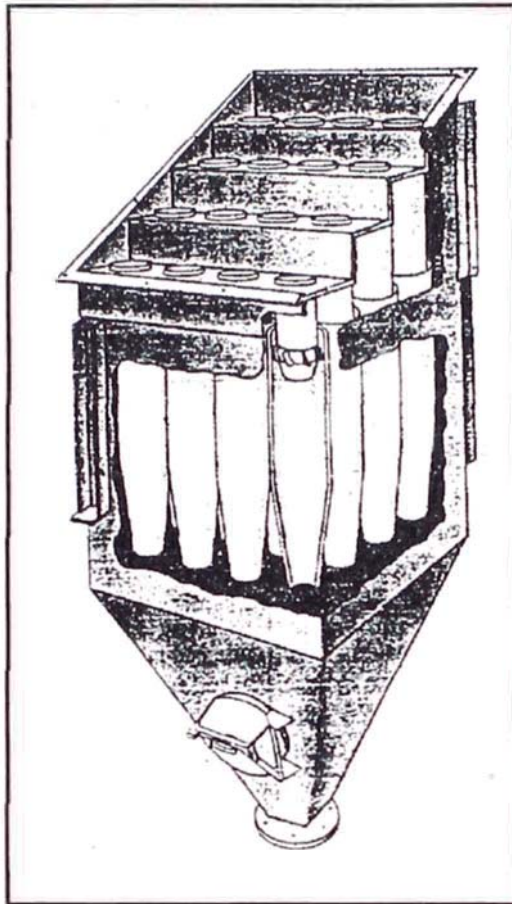


Figura 1.5. Curvas de eficiencia de captura contra diámetro de partícula para los ciclones. En esta figura, las tres curvas deben pasar por 0.5 en $D=D_{\text{corte}}$.

1.1.1.3. Precipitadores Electrostáticos. Si los sedimentadores por gravedad y los separadores centrifugos son aparatos que impulsan las partículas contra una pared sólida y si ninguno de los dos tipos puede funcionar con eficacia (a escala industrial) para partículas por debajo de más o menos $5 \mu\text{m}$ de diámetro entonces, para que los aparatos de captura por pared trabajen sobre las partículas más pequeñas, deben ejercer fuerzas que sean más poderosas que la de gravedad o la centrifuga. El precipitador electrostático (ESP, electrostatic precipitador) es como un sedimentador por gravedad o un separador centrifugo, pero la fuerza electrostática impulsa las partículas hacia la pared. Es eficaz sobre partículas mucha más pequeñas que los dispositivos anteriores.

En las tres clases de dispositivos, la resistencia viscosa (ley de Stokes) de la partícula que se está impulsando hacia la pared es proporcional al diámetro de la propia partícula. Para los separadores por gravedad y centrífugos, la fuerza que se puede ejercer es proporcional a la masa de la partícula, la cual, para una densidad constante, es proporcional al cubo del diámetro. Por tanto, la relación de la fuerza impulsora a la fuerza resistente resultó proporcional a (diámetro al cubo/diámetro) diámetro al cuadrado. Al disminuir el diámetro, esta relación cae con rapidez. En los ESP, la fuerza resistente todavía es la fuerza viscosa de retardo de Stokes, pero la fuerza que mueve la partícula hacia la pared es electrostática. Esta fuerza es prácticamente proporcional al cuadrado del diámetro de la partícula y, por consiguiente, la relación de la fuerza impulsora a la resistente es proporcional al (diámetro al cuadrado/diámetro) diámetro. De este modo, para un ESP, resulta más difícil capturar partículas pequeñas que las grandes, pero la dificultad es proporcional a $1/D$, más bien que a $1/D^2$ como lo es en aparatos gravitacionales o centrífugos.

La idea básica de los ESP es impartir a las partículas una carga electrostática, luego ponerlas en un campo electrostático que las impulsa hacia una pared colectora. En forma inherente consta de dos etapas, la carga y la captura se llevan a cabo en partes separadas del mismo. Este tipo se usa mucho en los acondicionadores de aires para edificios, a veces se le menciona como filtro electrónico para aire. Para las aplicaciones industriales, estos dos pasos se llevan en una cámara. Como se muestra en la figura 1.7 una forma simplificada de ESP de alambres y placas, que se encuentran conectadas eléctricamente a tierra (voltaje=0). Entre las placas se encuentran filas de alambres en general a -4000 volts. Esta combinación de alambres cargados y placas conectadas a tierra tiene como efecto el que los electrones libres carguen las partículas y que el campo las impulse contra las placas. Sobre las placas, las partículas pierden su carga y se adhieren entre sí y a la placa, formando una "torta". Entonces el gas limpiado sale por el lado lejano del precipitador.

Las tortas sólidas se extraen mediante golpes verticales u horizontales al borde de la placa. A través de la ciencia y la experiencia se ha logrado construir sistemas que permitan captar las tortas en tolvas colocadas debajo de las placas.

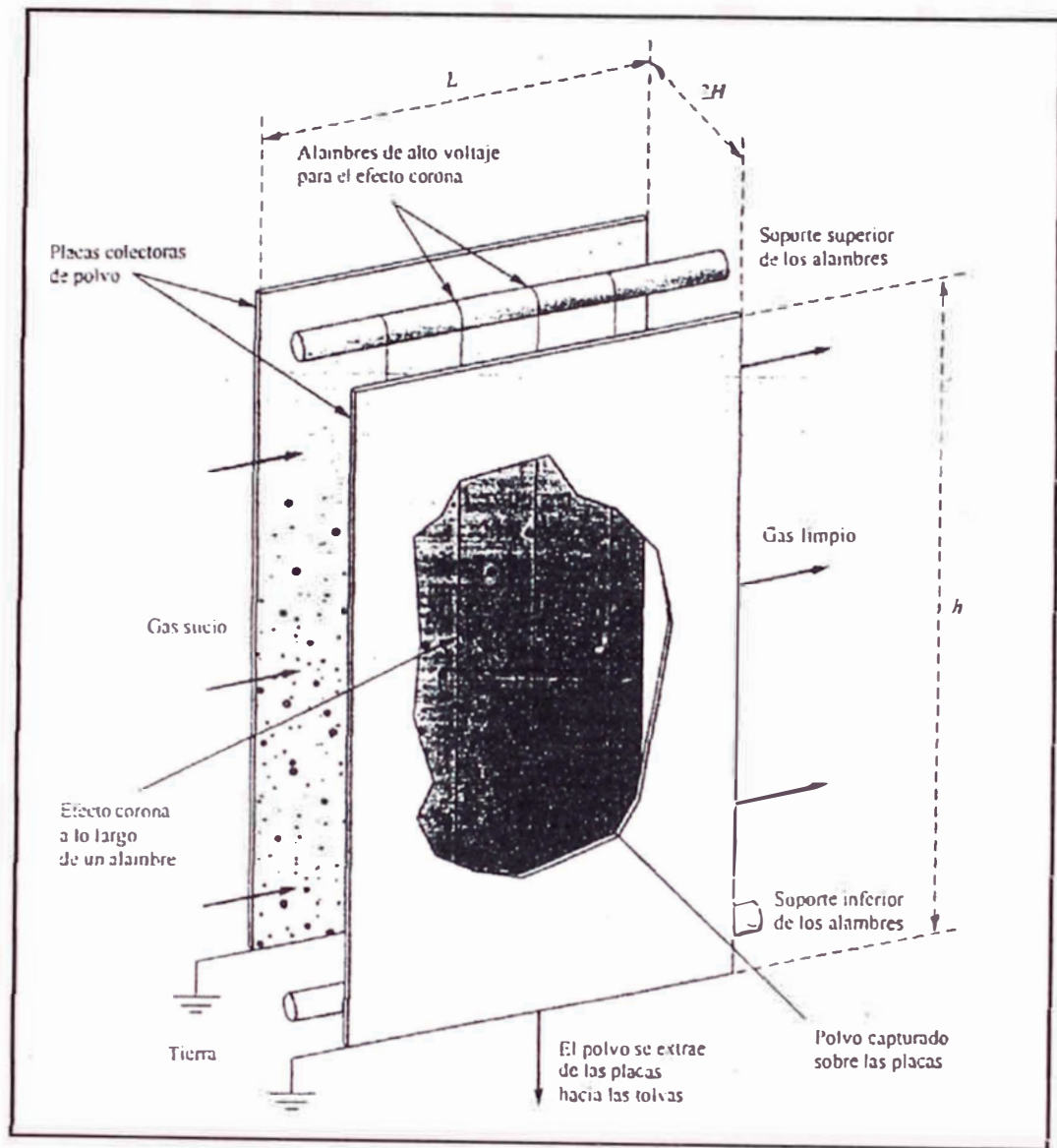


Figura 1.6. Esquema de un ESP simplificado, con dos placas, cuatro alambres y un canal de flujo. Los ESP de tamaño industrial tienen muchos canales en paralelo.

El campo eléctrico se crea a partir de la premisa que en cada punto del espacio existe algún potencial eléctrico V . Si el potencial eléctrico cambia de lugar a lugar, entonces se tiene un campo eléctrico, $E = -\delta V / \delta x$, en ese espacio. Si se conectan dos de esos puntos con un conductor, entonces fluirá corriente. Este V es el voltaje con el que el lector está familiarizado y E es su gradiente en cualquier dirección. Las unidades de E son V/m . Cuando un electrón disperso, proveniente de cualquiera de una diversidad de fuentes, encuentra este fuerte campo, es acelerado con rapidez y alcanza una alta velocidad. Si entonces, choca contra una molécula de gas, tiene energía suficiente como para desprender uno o más electrones, ionizando de esta manera la molécula de gas. Del mismo modo, estos electrones son acelerados por el campo y desprenden más electrones, hasta que se tienen suficientes electrones libres como para formar un *efecto corona* estacionario. En un cuarto oscuro este efecto tiene la apariencia de un brillo borroso que forma un forro circular en torno al alambre, hacia la placa. Una vez que se alejan lo suficiente del alambre de tal modo que la intensidad del campo sea demasiado baja como para acelerarlos hasta el punto en que puedan ionizar moléculas de gas, deja de existir la corona visible y sencillamente fluyen como electrones libres.

A medida que los electrones fluyen hacia la placa, encuentran partículas y pueden ser capturados por ellas, cargándolas de este modo. Entonces, el mismo campo eléctrico que creó los electrones y que los impulsó hacia la placa, encuentran partículas y pueden ser capturados por ellas, cargándolas de este modo. Entonces, el mismo campo eléctrico que creó los electrones y que los impulsó hacia la placa también impulsa las partículas cargadas hacia ésta.

Para partículas de mayor tamaño que alrededor de $0.15 \mu m$, el mecanismo dominante de carga es la *carga por el campo*. Esto es equivalente a la captura de cualquier electrón por cualquier partícula que se encuentre en su camino. Sin embargo, conforme las partículas se cargan con mayor intensidad, desvían las trayectorias de los electrones, alejándolas de ellas. Por tanto, la carga crece con el tiempo alcanzando un valor de estado estacionario de

$$q = 3\pi \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) \varepsilon_0 D^2 E_0$$

Donde q es la carga de la partícula, ε es la constante dieléctrica de la partícula. La constante dieléctrica es un número adimensional que es igual a 1.0 en un vacío, a 1.0006 para el aire y de 4 a 8 para las partículas sólidas típicas. La permitividad del espacio libre, ε_0 es una constante dimensional cuyo valor en el SI de unidades es de $8.85 \times 10^{-12} \text{ C}/(\text{V}\cdot\text{m})$. D es el diámetro de la partícula y E_0 es la intensidad local del campo.

La fuerza electrostática sobre una partícula es

$$F = qE_p$$

Aquí E_p es la intensidad del campo eléctrico que causa la fuerza. La razón por la cual se usa E_p en esta ecuación y E_0 en la anterior es porque una partícula puede adquirir su carga en una región de alta E (cerca del alambre) y en seguida, moverse hacia una región de E inferior (cerca de la placa). Si se sustituye q por su expresión dada en la ecuación anterior se tiene que

$$F = 3\pi \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) \varepsilon_0 D^2 E_0 E_p$$

Los dos subíndices en las E recuerdan que una representa la intensidad del campo en el momento de la carga y la otra, la intensidad instantánea (local) del campo. Para fines prácticos se usa una E promedio. Si la resistencia de la partícula que está siendo impulsada hacia la pared por las fuerzas electrostáticas se expresa por la fuerza de retardo de Stokes, se puede igualar la fuerza de resistencia a la electrostática y despejar la velocidad resultante, para encontrar

$$w = \frac{D\varepsilon_0 E^2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right)}{\mu}$$

Esta es conocida por la velocidad de deriva, denotada por w . Igual a V_t hallada para las velocidades terminales de sedimentación por gravedad y centrífuga (de Nevers, 1997).